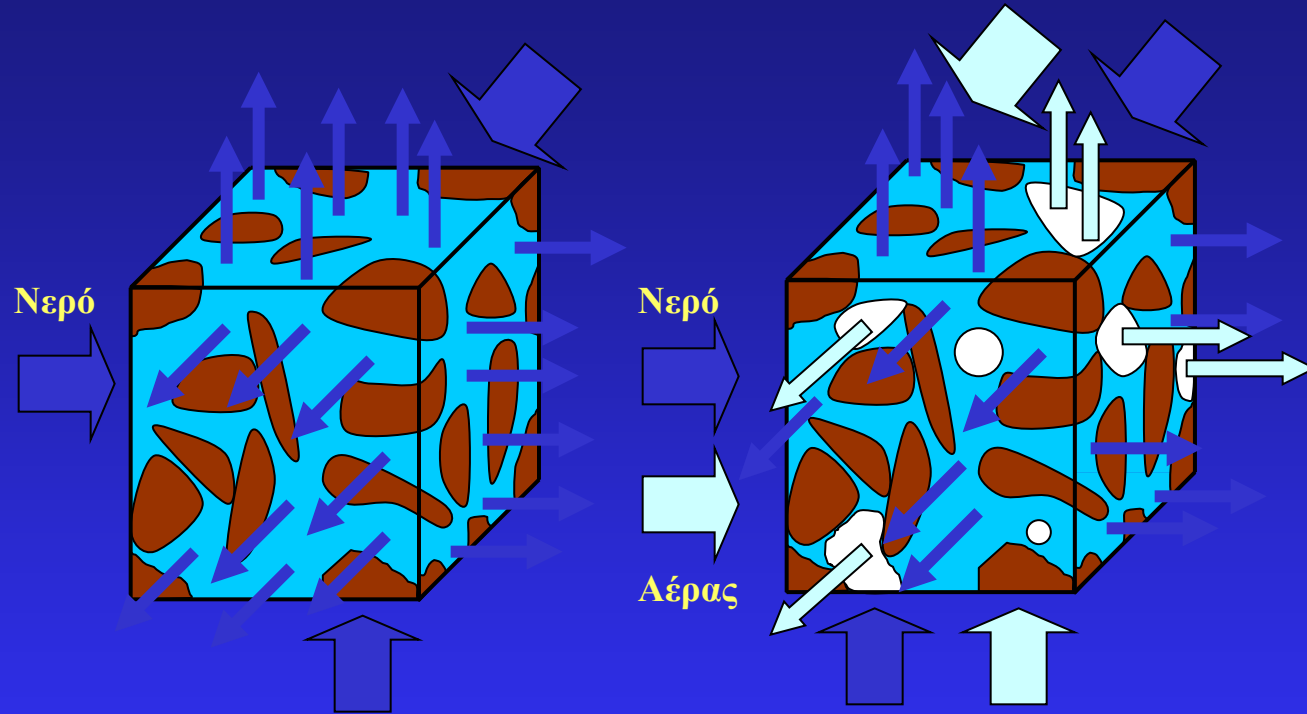




Ελληνική Επιστημονική Εταιρεία Εδαφομηχανικής & Γεωτεχνικής Μηχανικής



Μη κορεσμένα εδάφη

Μ. ΜΠΑΡΔΑΝΗΣ,

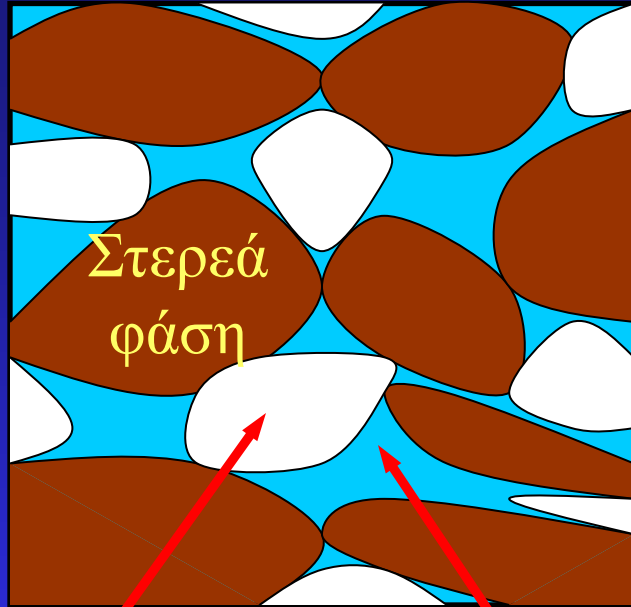
Πολιτικός Μηχανικός, MSc, Υποψ. Διδάκτορας Ε.Μ.Π., ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε.

Αθήνα, 30 Μαΐου 2011

Περίγραμμα της παρουσίασης

- Η φύση των μη κορεσμένων εδαφών
- Αρνητική πίεση πόρων και μύζηση (suction)
- Η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού
- Μέτρηση της μύζησης και της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού
- Συμπιεστότητα
- Διατμητική αντοχή
- Διαπερατότητα ως προς την υγρή φάση

Μη κορεσμένα και μερικώς κορεσμένα εδάφη



Αέρια φάση Υγρή φάση

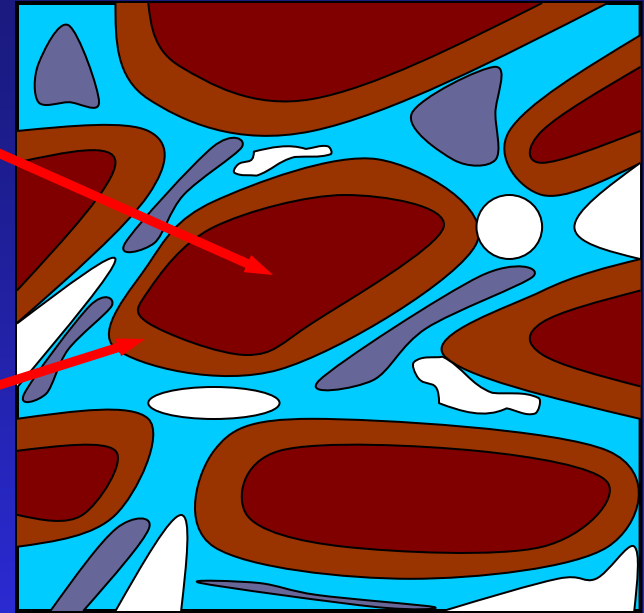
Μη κορεσμένο έδαφος
(unsaturated soil):

$$0 < S_r < 100\%$$

και ομοιογενές ως προς
τον βαθμό κορεσμού του

Συσσωμάτωμα
κόκκων και
πλακιδίων

Μή κορεσμένο
όριο
συσσωματώματος



Μερικώς κορεσμένο έδαφος
(partly saturated soil):

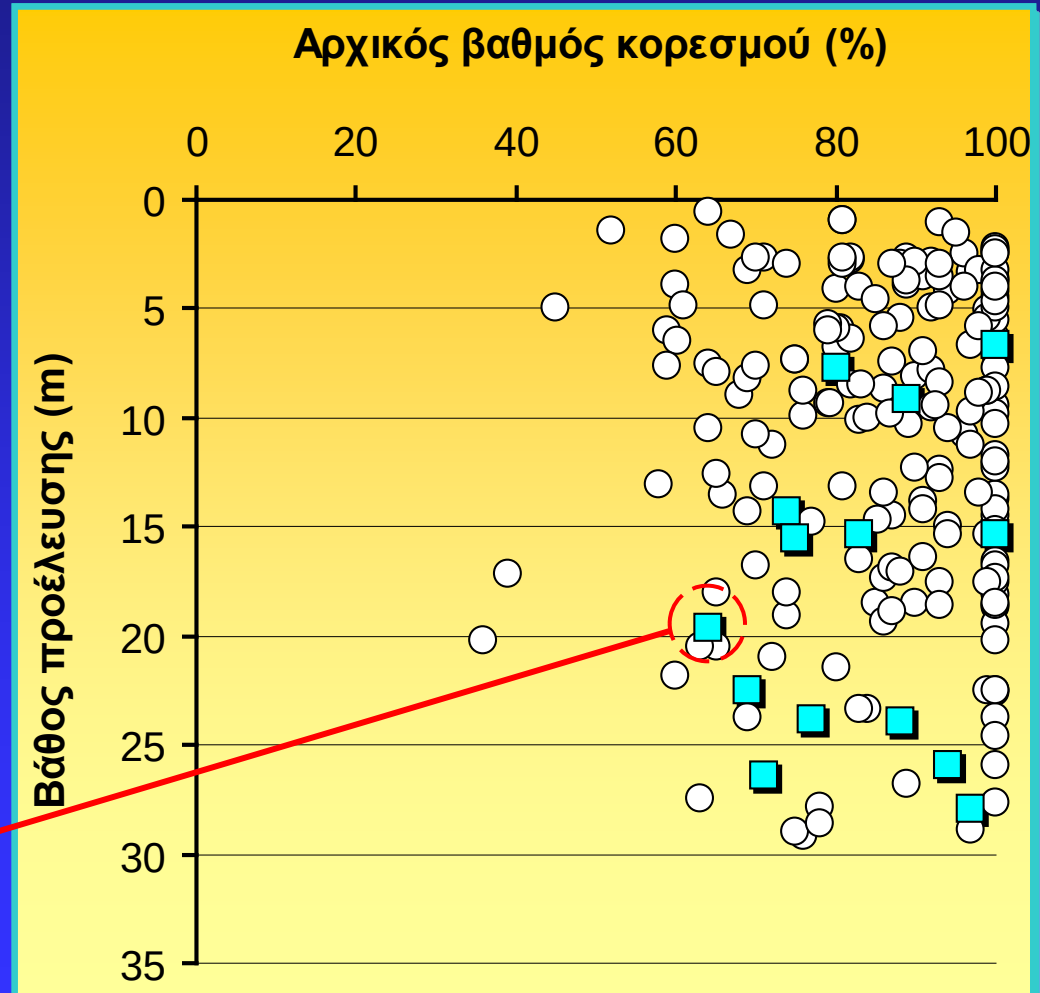
$$0 < S_r < 100\%$$

χωρίς απαίτηση ομοιογένειας
ως προς τον βαθμό κορεσμού

Υπάρχουν μη κορεσμένα εδάφη στην γεωτεχνική πράξη;

Εμφάνιση στον ελλαδικό χώρο

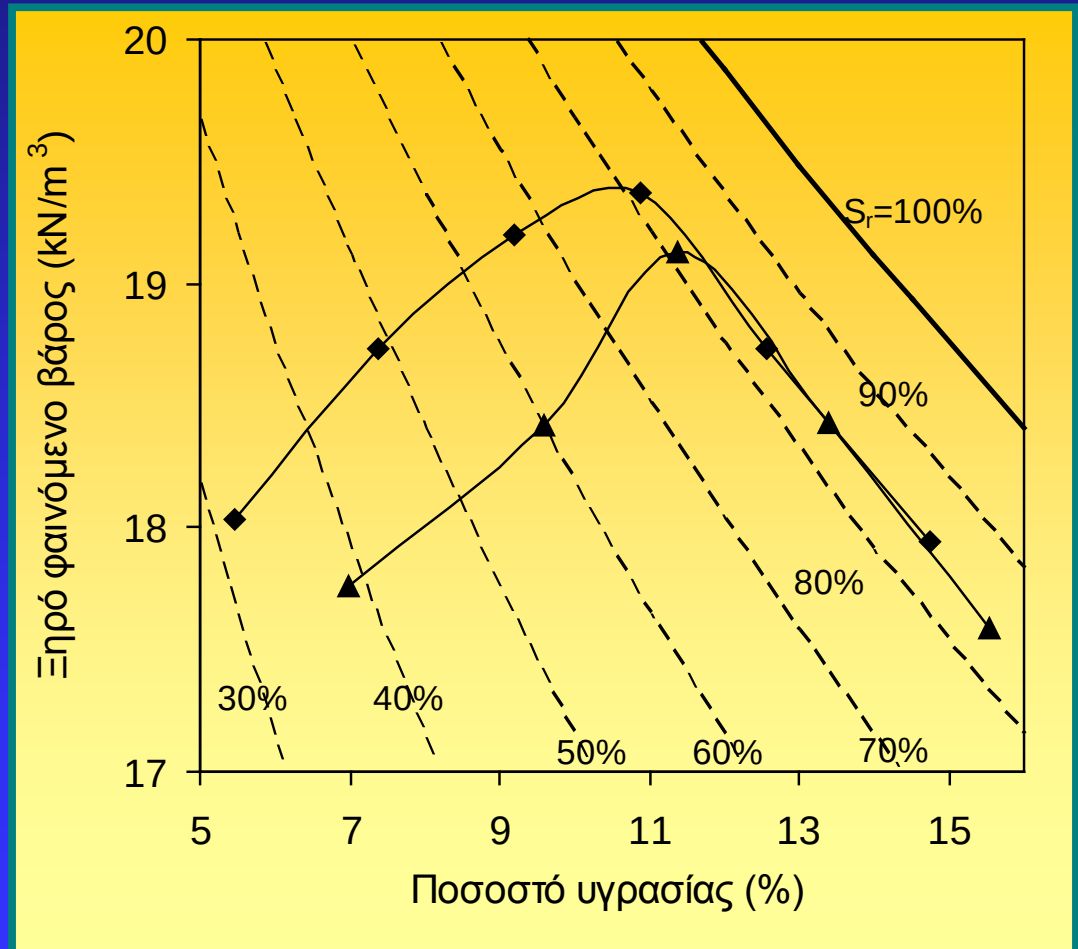
Τιμές βαθμού κορεσμού
αργιλικών εδαφών από τον
ελλαδικό χώρο
(Μπαρδάνης &
Καβουνίδης, 2001)



Υπάρχουν μη κορεσμένα εδάφη στην γεωτεχνική πράξη;

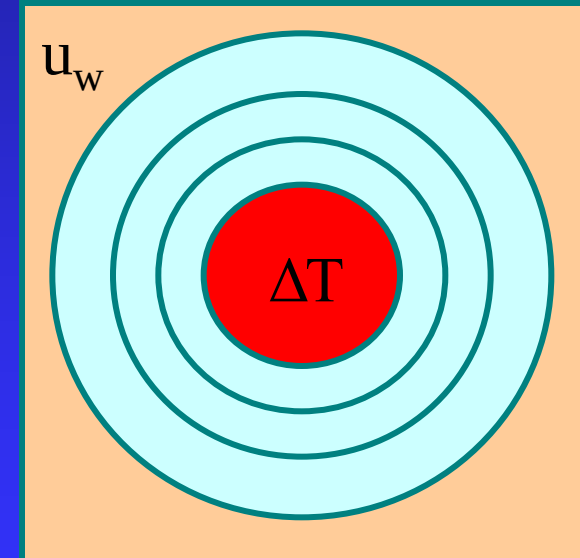
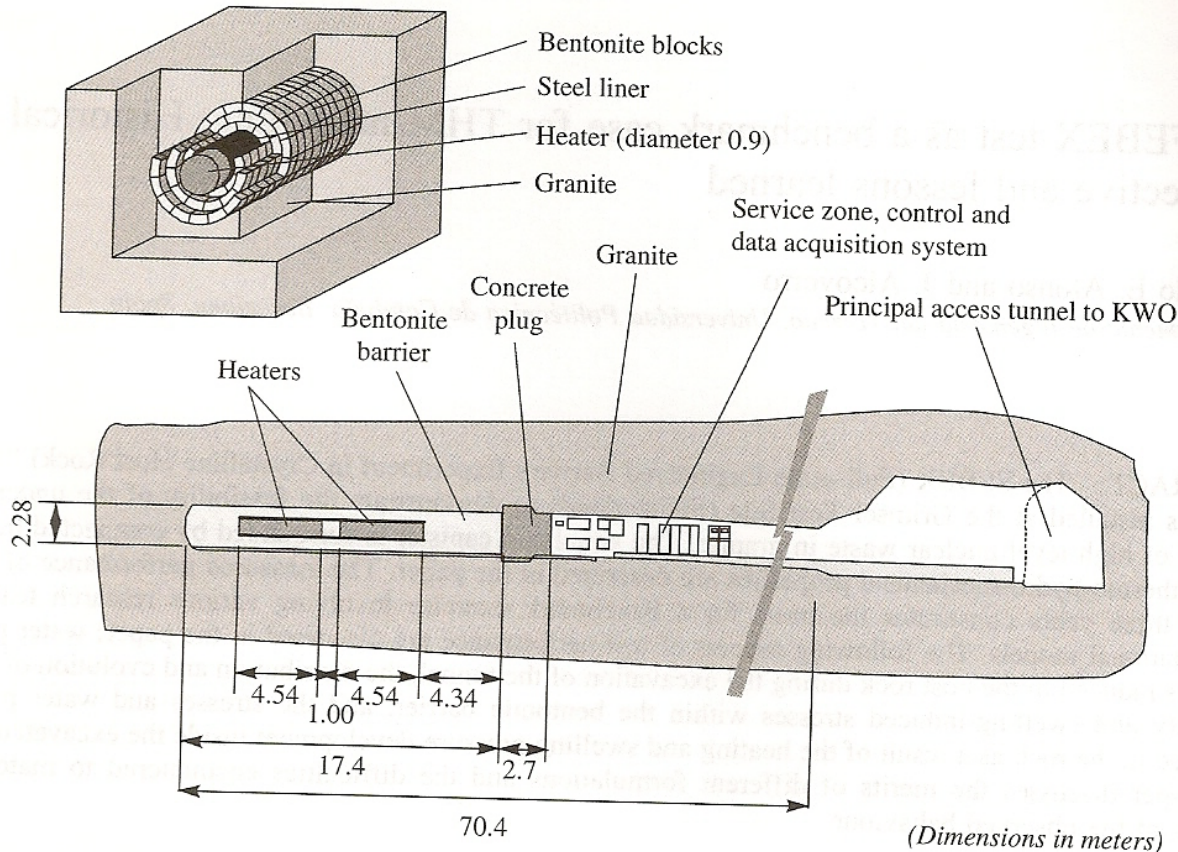
Συμπυκνωμένα εδάφη

Είναι πολύ συνηθισμένο συμπυκνωμένα εδάφη να παραμένουν μη κορεσμένα ακόμα και αρκετά «υγρά» από την βέλτιστη υγρασία (παράδειγμα ενός αποσαθρωμένου σερπεντινίτη από την Σκύρο)

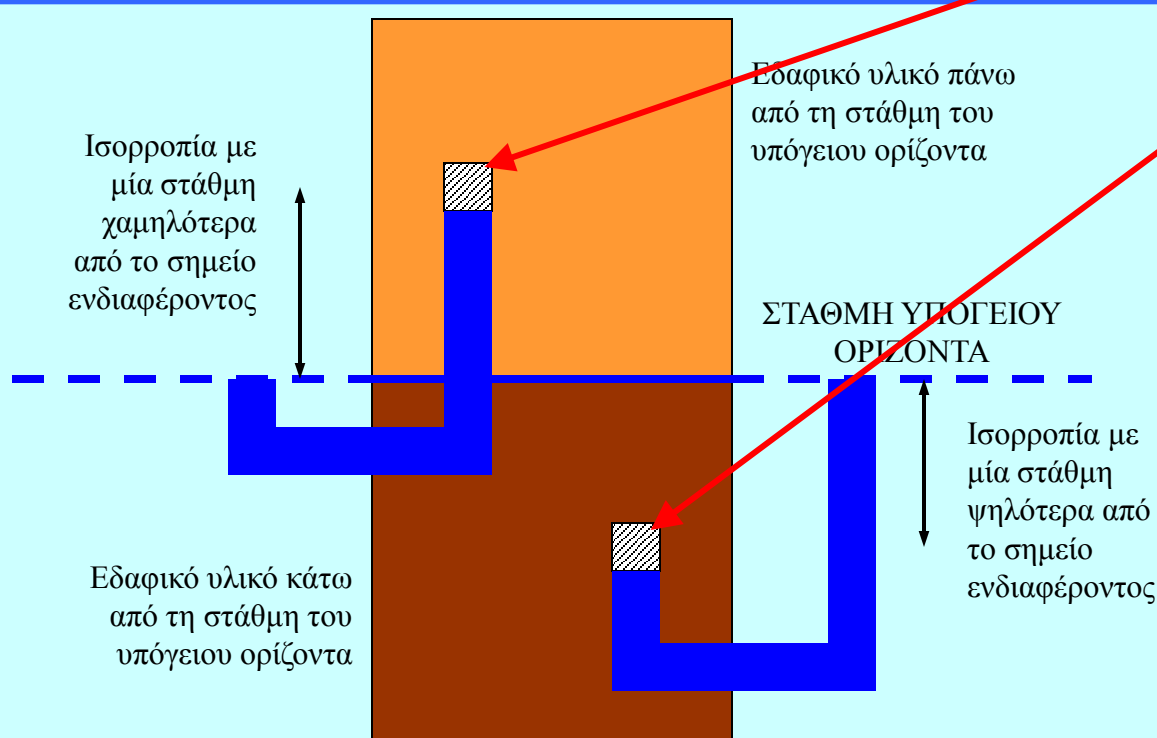
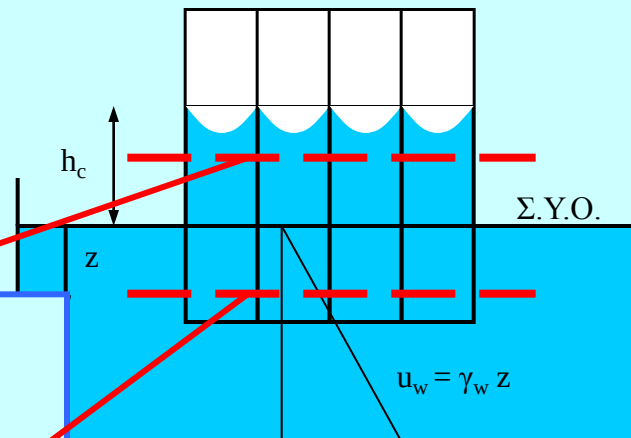
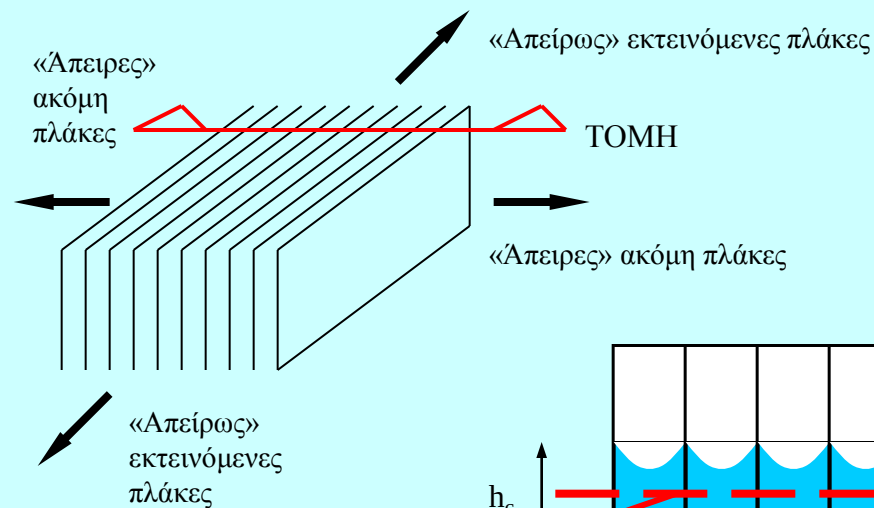


Υπάρχουν μη κορεσμένα εδάφη στην γεωτεχνική πράξη;

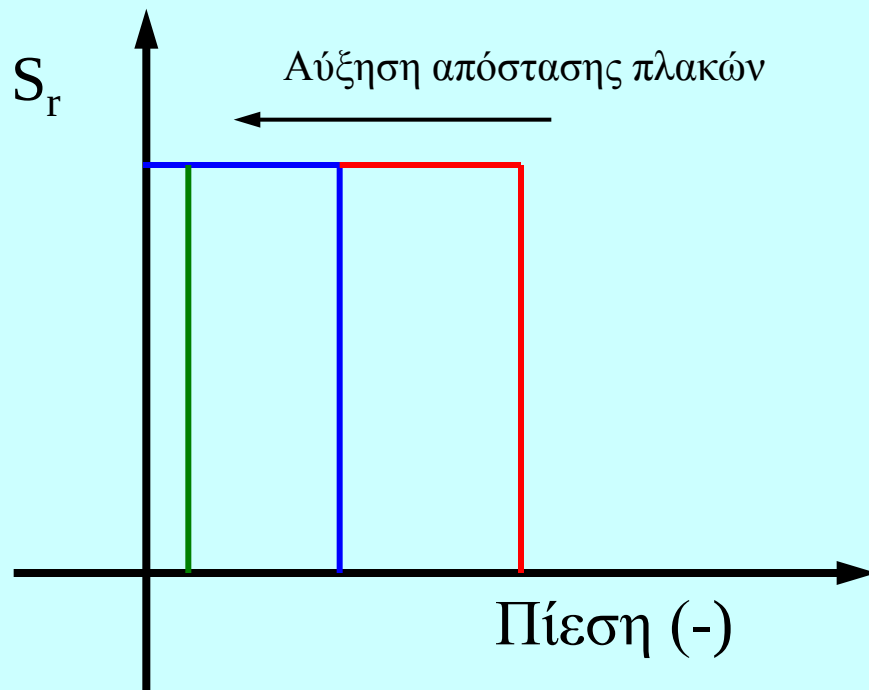
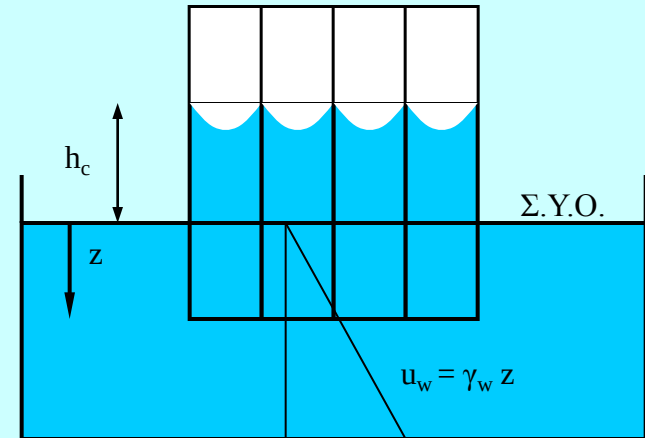
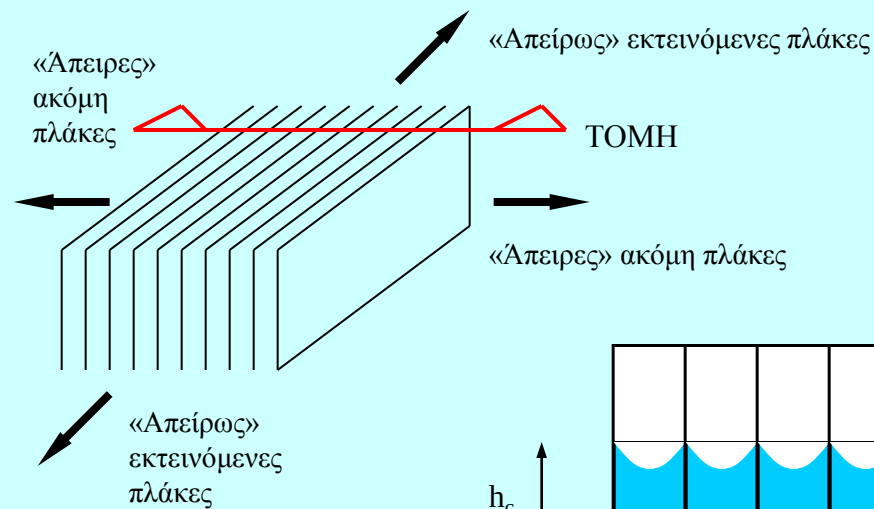
Απεικόνιση του πειράματος FEBEX (Full-scale Engineered Barriers EXperiment in Crystalline Host Rock) στο πεδίο δοκιμών Grimsel στην Ελβετία για την προσομοίωση της ταφής κανίστρων με πυρηνικά απόβλητα μέσα σε γρανιτικό περιβάλλον



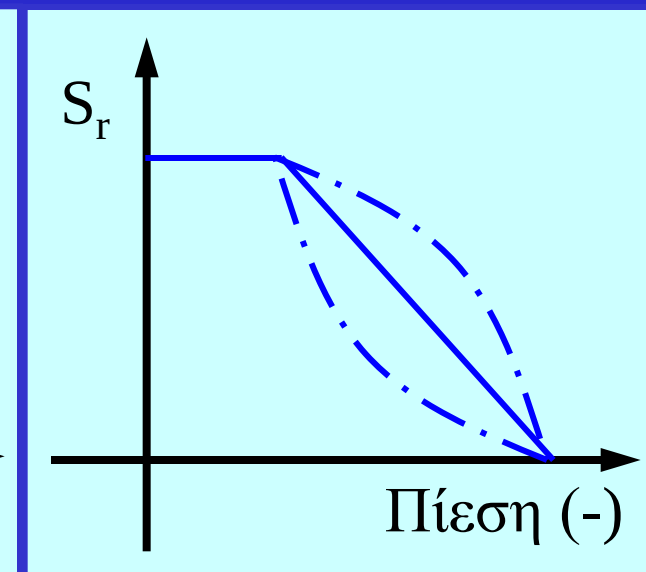
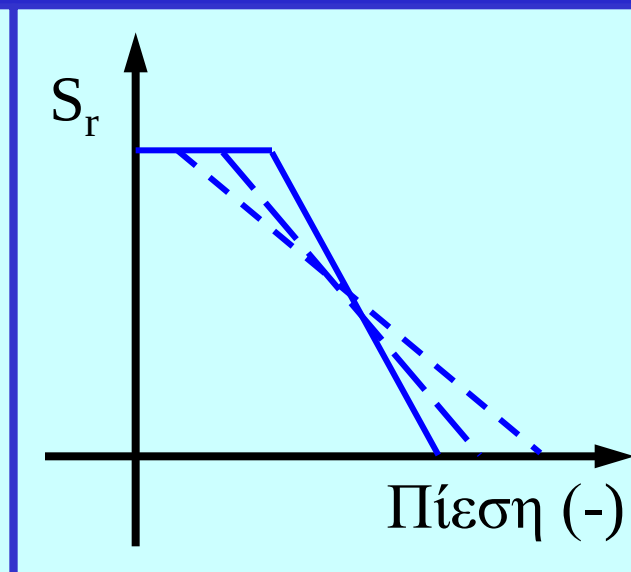
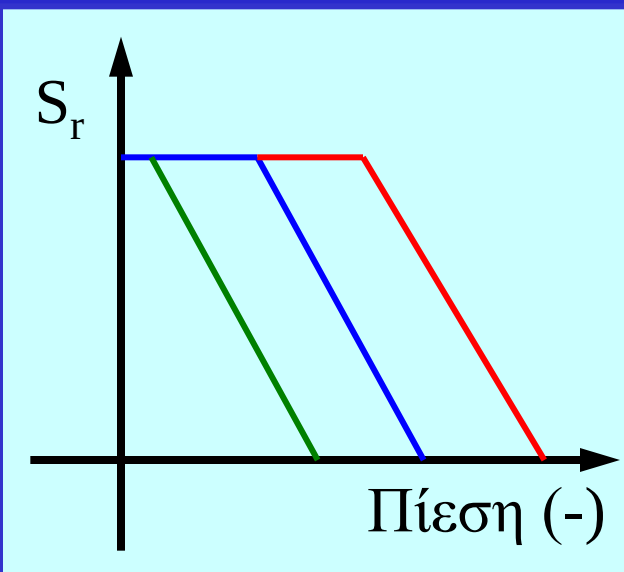
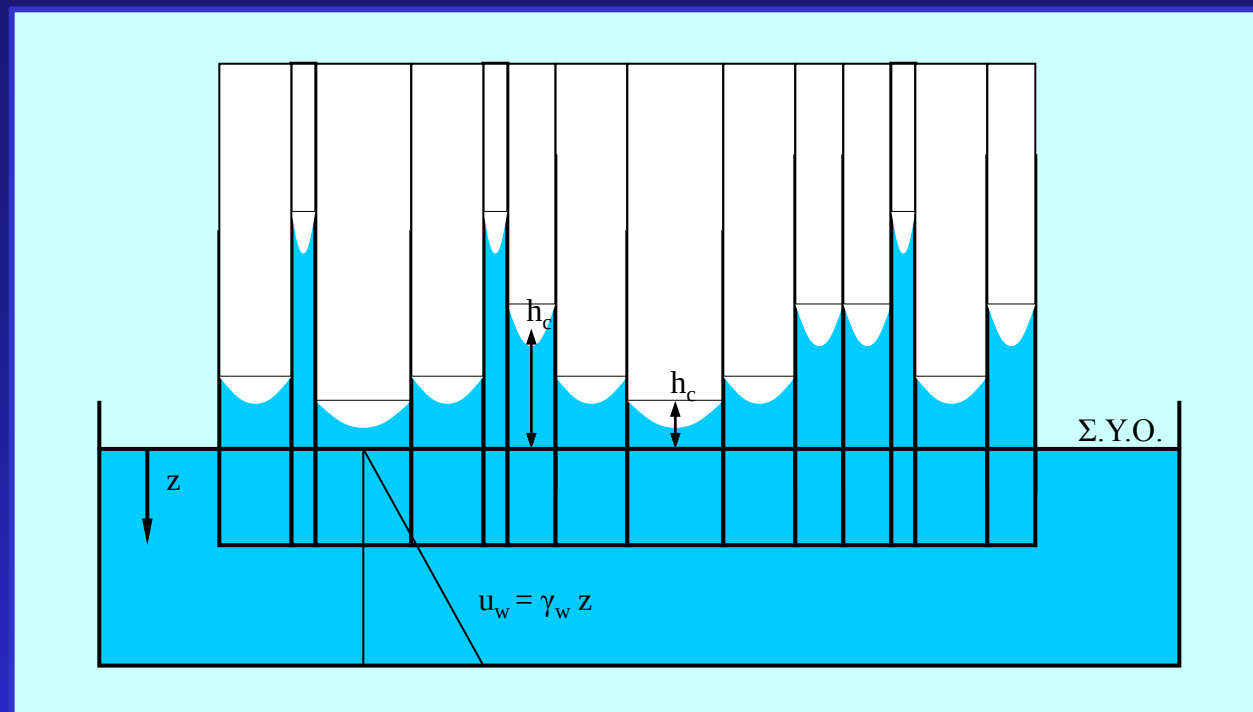
**Ένα ιδεατό
προσομοίωμα:
Βαθμός κορεσμού και
πίεση στην υγρή φάση
σε «άπειρες»,
«απείρως»
εκτεινόμενες πλάκες,
ΣΤΑΘΕΡΗ
ΑΠΟΣΤΑΣΗ**



**Ένα ιδεατό
προσομοίωμα:
Βαθμός κορεσμού και
πίεση στην υγρή φάση
σε «άπειρες»,
«απείρως»
εκτεινόμενες πλάκες,
ΣΤΑΘΕΡΗ
ΑΠΟΣΤΑΣΗ**



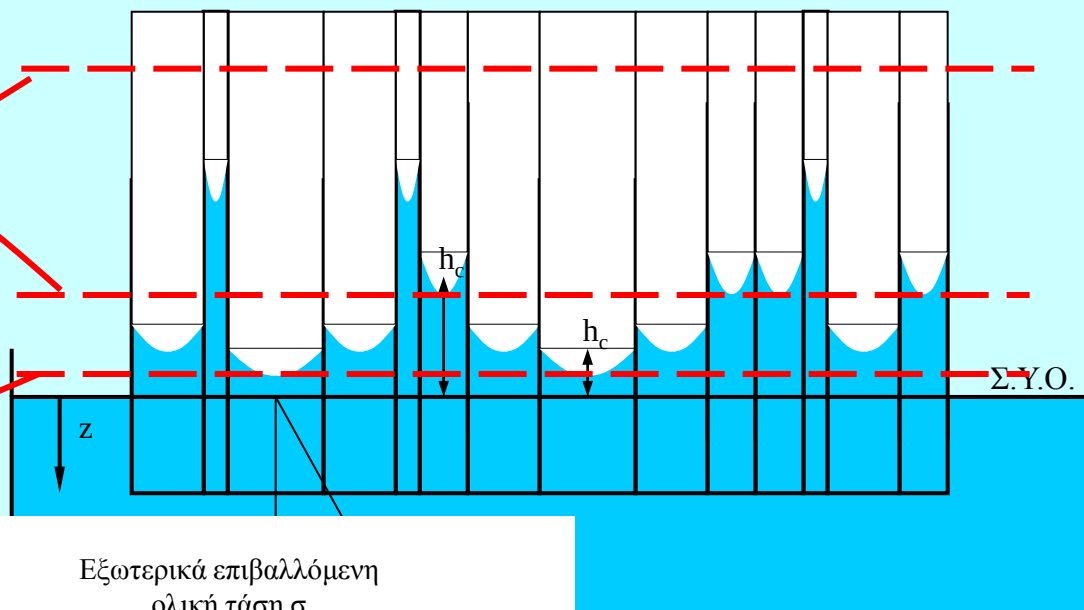
Ένα ιδεατό
προσομοίωμα:
Βαθμός κορεσμού
και πίεση στην υγρή
φάση σε «άπειρες»,
«απείρως»
εκτεινόμενες πλάκες,
ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΗ
ΑΠΟΣΤΑΣΗ



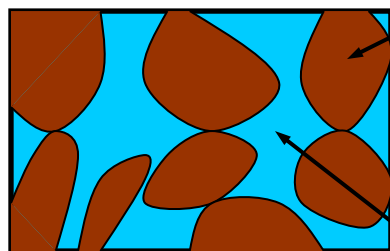
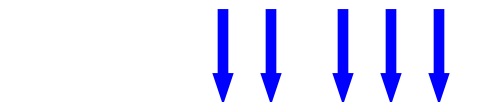
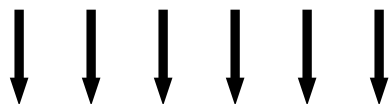
Μόνο
αέρας

?

Μόνο
νερό



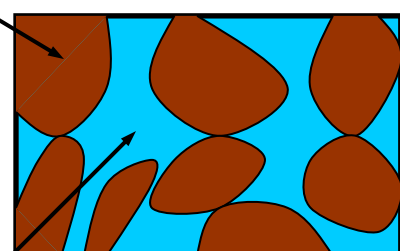
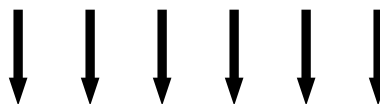
Εξωτερικά επιβαλλόμενη
ολική τάση σ



(α)

Εδαφικό υλικό σε ισορροπία με εξωτερικά
επιβαλλόμενη τάση σ και θετική πίεση πόρων

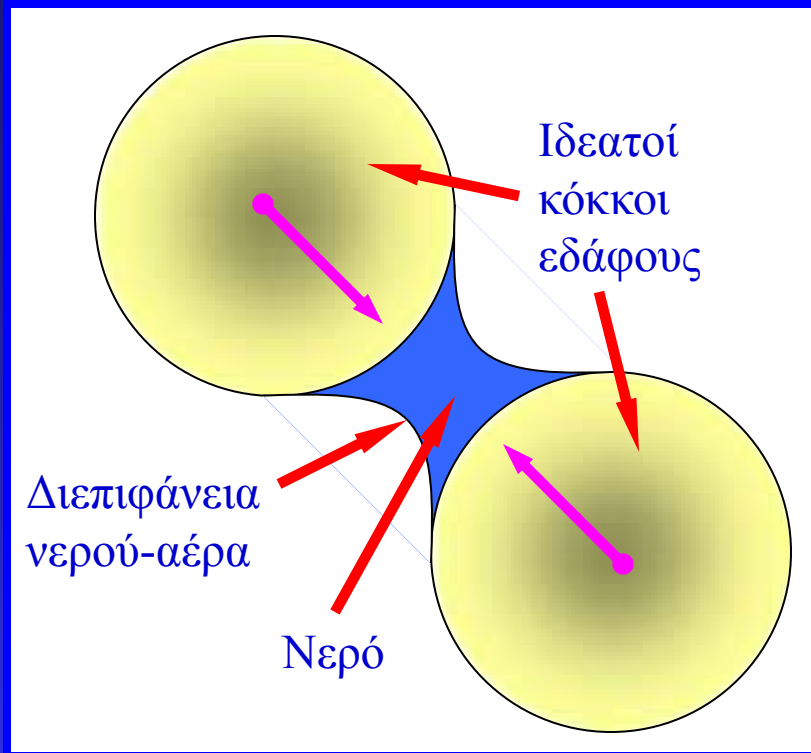
Εξωτερικά επιβαλλόμενη
ολική τάση σ



(β)

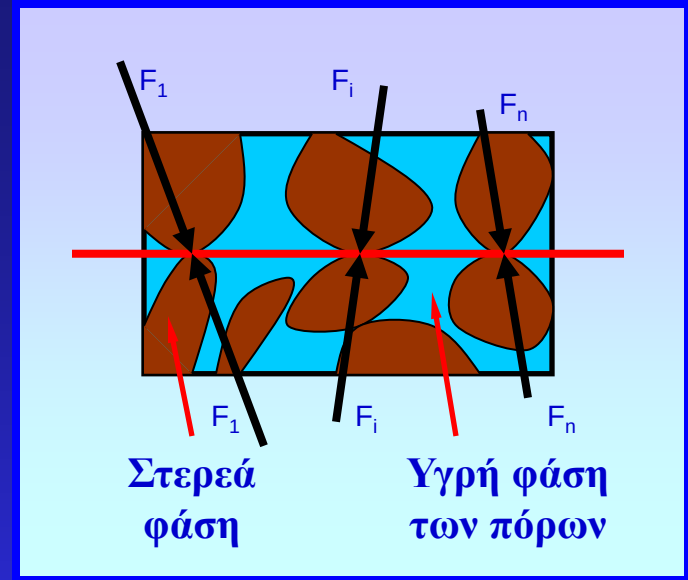
Εδαφικό υλικό σε ισορροπία με εξωτερικά
επιβαλλόμενη τάση σ και αρνητική πίεση πόρων

Η μύζηση (suction)

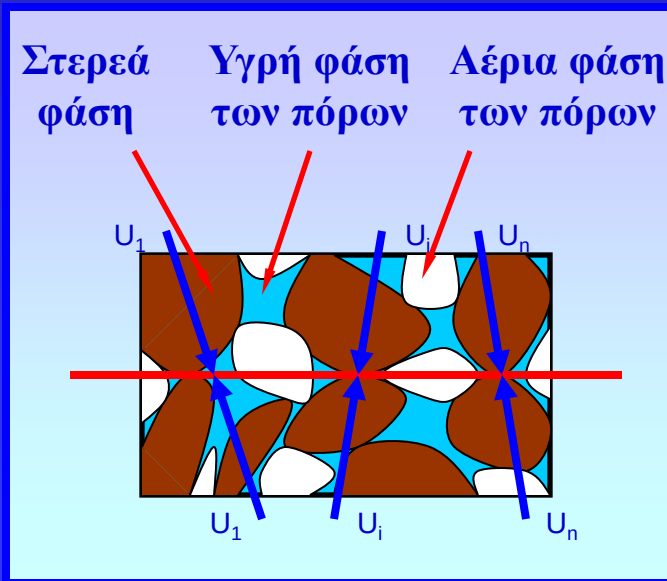


Οι «μηνίσκοι» νερού (water menisci) μεταξύ των σωματιδίων προκαλούν δυνάμεις έλξης μεταξύ τους

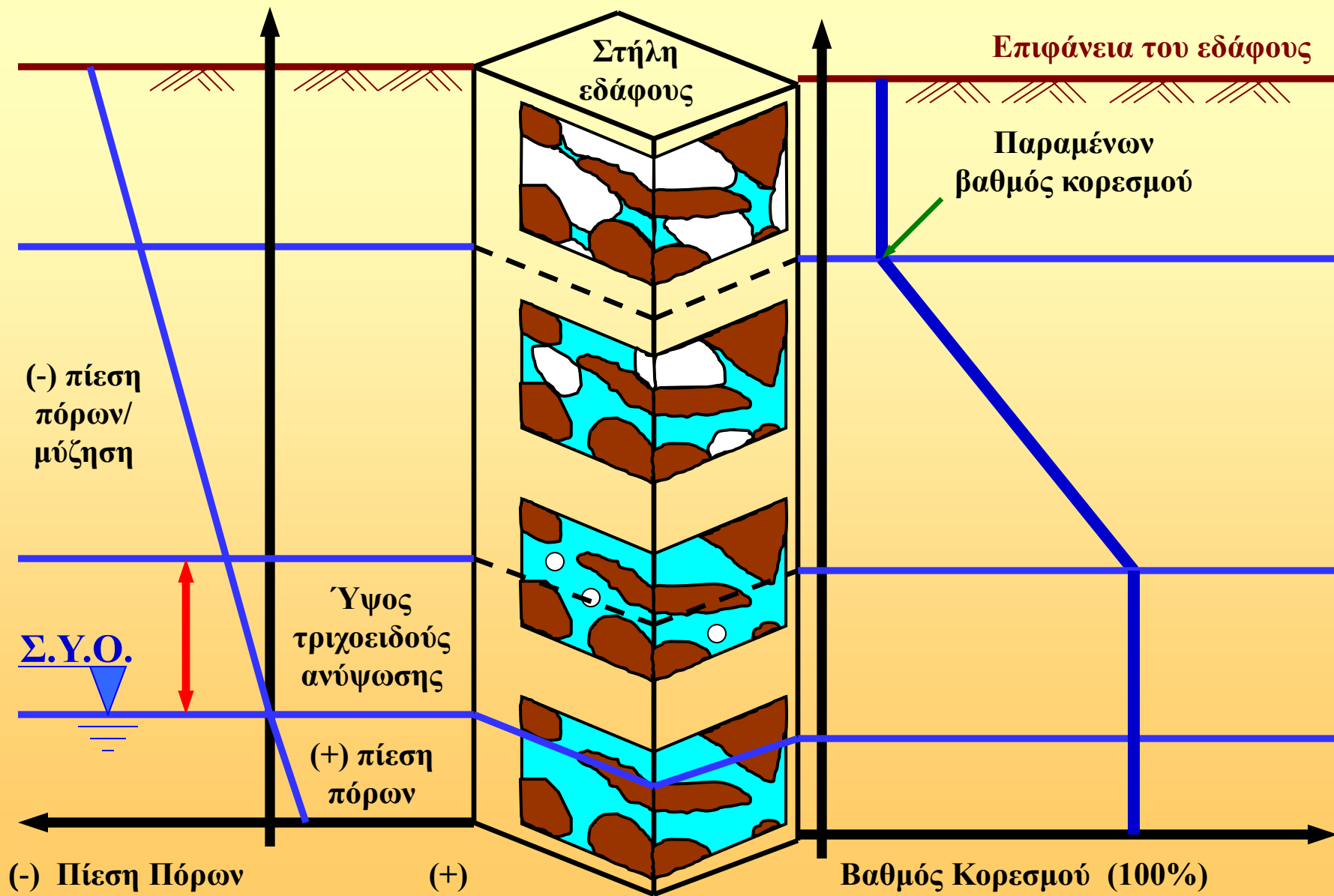
Ενεργός
τάση



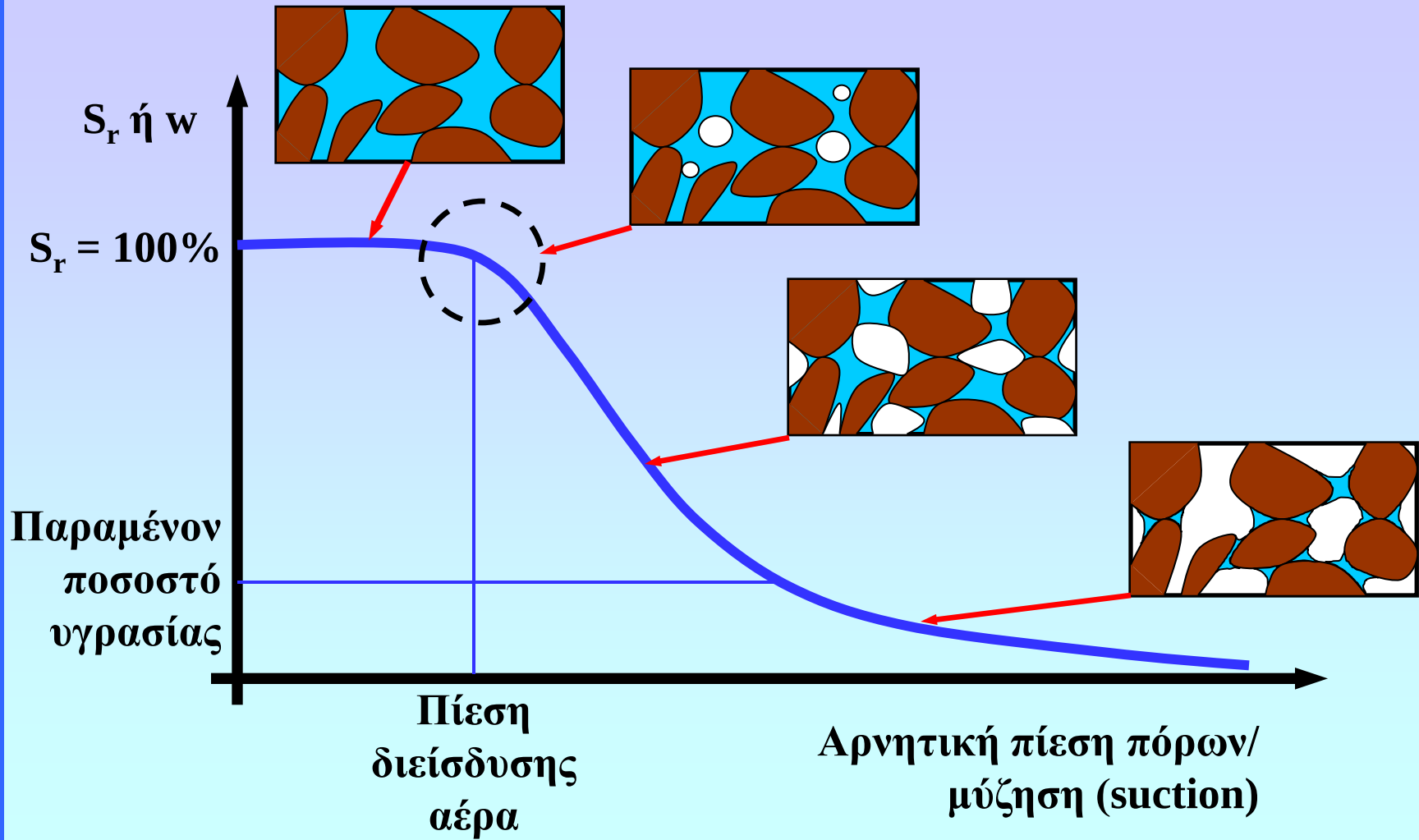
Στερεά φάση Υγρή φάση των πόρων Αέρια φάση των πόρων



Μύζηση

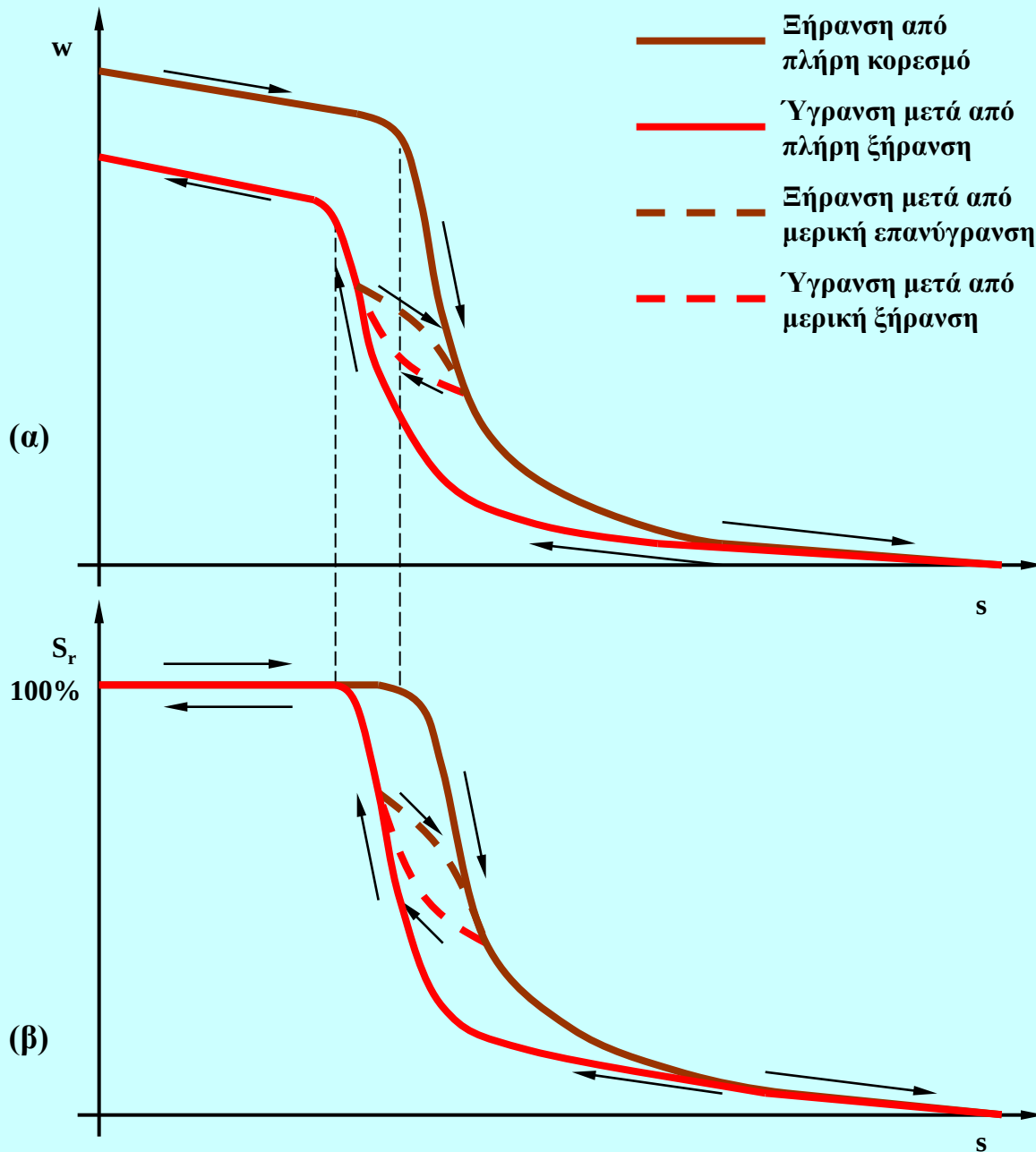


Χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού



Χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού

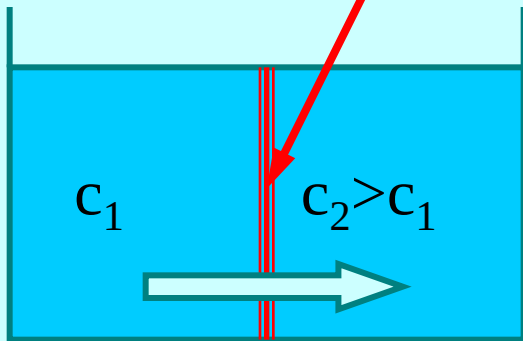
Η καμπύλη αυτή
παρουσιάζει
σημαντική υστέρηση
μεταξύ ξήρανσης και
ύγρυνσης



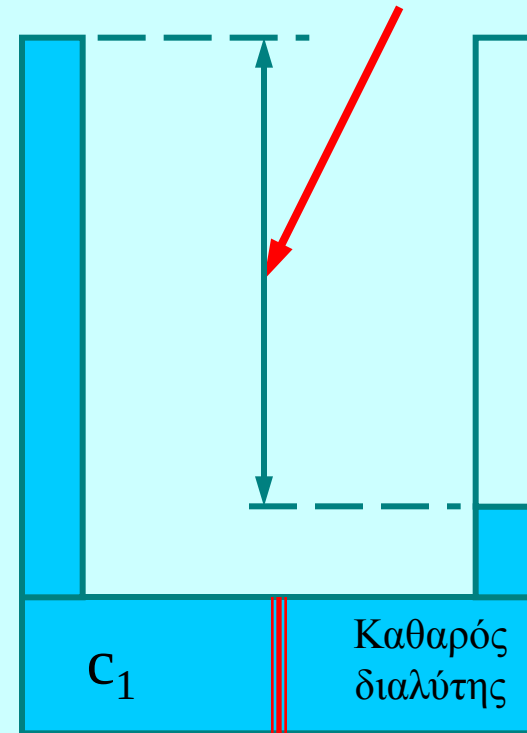
Η μύζηση δεν έχει μόνο «μηχανική» συνιστώσα Το φαινόμενο της ώσμωσης

Διαλύματα
διαφορετικών
συγκεντρώσεων

Ημιδιαπερατή
μεμβράνη



Ωσμωτικό δυναμικό διαλύματος



Τα είδη της μύζησης

- Η μύζηση εδαφικού σκελετού (matrix ή matric suction) – s , $u_a - u_w$
η τάση που υπάρχει σε ένα μόριο νερού στην υγρή φάση (δηλ. η ικανότητα του εδάφους να αντιστέκεται στην απώλεια νερού χωρίς αυτό να αλλάζει φάση)
- Η ολική μύζηση (total suction) – ψ , s
η τάση που απαιτείται ώστε να εξαχθεί ένα μόριο νερού από την υγρή φάση των πόρων και να βρεθεί στην αέρια φάση (δηλ. η ικανότητα του εδάφους να αντιστέκεται στην απώλεια νερού από την μετάπτωση του τελευταίου από την υγρή στην αέρια φάση)
- Η ωσμωτική συνιστώσα της μύζησης (osmotic component of suction) ή διαφορική μύζηση – Π , Ω
η διαφορά των δύο προηγούμενων μεγεθών – υπάρχει μεγάλη συζήτηση διεθνώς μέχρι σήμερα αν πράγματι ταυτίζεται με το ωσμωτικό δυναμικό της υγρής φάσης των πόρων θεωρούμενης ως διάλυμα!!!!

Ο νόμος τους Kelvin

Ο Kelvin (1871) διατύπωσε την ομώνυμη εξίσωση:

$$\psi = (RT/gm) \ln RH$$

- R: παγκόσμια σταθερά των αερίων
- T: απόλυτη θερμοκρασία
- g: η επιτάχυνση της βαρύτητας
- m: το μοριακό βάρος του νερού
- RH: η σχετική υγρασία

Η αρχή των ενεργών τάσεων...

Πηγή	Εξίσωση για την Αρχή των Ενεργών Τάσεων	Περιγραφή μεταβλητών
Hilf, 1956	$u = u_a + u_c$ όπου $u_c = (-) T \{1/r_1 + 1/r_2\}$	T: επιφανειακή τάση του νερού r_1, r_2 : εσωτερική και εξωτερική ακτίνα μηνίσκων υγρής φάσης
Croney, Coleman & Black, 1958	$\sigma' = \sigma - \beta' u_w$	β' : Παράμετρος «συγκόλλησης» που αποτελεί το μέτρο του αριθμού των δεσμών υπό εφελκυσμό που συνεισφέρουν στην διατμητική αντοχή του εδαφικού υλικού
Bishop, 1959	$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi (u_a - u_w)$	χ : Παράμετρος που συσχετίζεται με τον βαθμό κορεσμού
Lambe, 1960	$\sigma = \sigma \alpha_m + u_a \alpha_a + u_w \alpha_w + R - A$	α_a : Ποσοστό συνολικής επιφάνειας που καταλαμβάνεται από αέρα α_w : Ποσοστό συνολικής επιφάνειας που καταλαμβάνεται από νερό α_m : Ποσοστό συνολικής επιφάνειας που καταλαμβάνεται από τη στερεά φάση
Aitchison, 1961	$\sigma' = \sigma + \psi p''$	ψ : Παράμετρος με τιμές από 0 έως 1 p'' : υπόλειμμα πίεσης του νερού των πόρων
Jennings, 1961	$\sigma' = \sigma + \beta p''$	β : Στατιστικός συντελεστής ίδιου τύπου με την επιφάνεια επαφής. Πρέπει να μετρείται πειραματικά σε κάθε ξεχωριστή περίπτωση
Richards, 1966	$\sigma' = \sigma - u_a + \chi_m (h_m + u_a) + \chi_s (h_s + u_a)$	χ_m : Παράμετρος ενεργού τάσης για την μύζηση εδαφικού σκελετού h_m : Μύζηση εδαφικού σκελετού χ_s : Παράμετρος ενεργού τάσης για την ωσμωτική συνιστώσα της μύζησης h_s : Ωσμωτική συνιστώσα της μύζησης

Παράμετροι Τάσης στα Μη Κορεσμένα Εδάφη

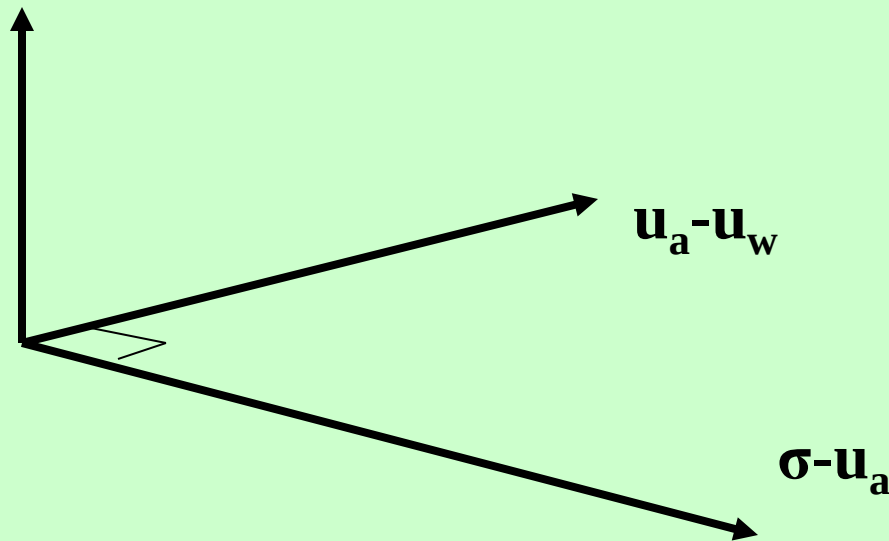
Η έλλειψη μίας σαφώς διατυπωμένης αρχής των ενεργών τάσεων αφήνει ένα κενό στη διαχείριση των προβλημάτων της εδαφομηχανικής μέσω **μίας παραμέτρου μόνο**.

Κατά συνέπεια γίνεται χρήση δύο παραμέτρων τάσης:

$$\sigma - u_a$$

$$u_a - u_w$$

Κάθε άλλη
παραμέτρος



Μέθοδοι μέτρησης της μύζησης

- Μέθοδοι μέτρησης της μύζησης εδαφικού σκελετού και της ολικής μύζησης
- Μέθοδοι μέτρησης της μύζησης επιτόπου και στο εργαστήριο
- Κατάταξη των μεθόδων ανάλογα με τον τρόπο μέτρησης:
 - Μέθοδοι άμεσης μέτρησης
 - Μέθοδοι έμμεσης μέτρησης
 - Μέθοδοι έμμεσου προσδιορισμού

Μέθοδοι μέτρησης της μύζησης

Όργανο μέτρησης	Είδος μύζησης που μετρούν	Επιτόπου ή εργαστήριο	Κατάταξη μεθόδου	Εύρος μέτρησης μύζησης	Χρόνος απόκρισης
Πιεζόμετρα δονούμενης χορδής	Μύζηση εδαφικού σκελετού	Μόνο επιτόπου	Άμεσης μέτρησης	0-95kPa	Λεπτά έως ώρες
Τενσιόμετρα πορολίθου ΠΔΑ 100kPa	Μύζηση εδαφικού σκελετού	Και τα δύο	Άμεσης μέτρησης	0-95kPa	Λεπτά έως ώρες
Τενσιόμετρα πορολίθου ΠΔΑ 1500kPa	Μύζηση εδαφικού σκελετού	Μόνο στο εργαστήριο	Άμεσης μέτρησης	0-1500kPa	Λεπτά έως ώρες
Θάλαμοι μύζησης	Μύζηση εδαφικού σκελετού	Μόνο στο εργαστήριο	Έμμεσης μέτρησης	0-1500kPa	Λεπτά έως ώρες
Ψυχρόμετρα	Ολική μύζηση	Μόνο στο εργαστήριο	Έμμεσου προσδιορισμού	100kPa-1000000kPa	Λεπτά έως ώρες
Τεμάχια πορωδών υλικών	Μύζηση εδαφικού σκελετού	Μόνο επιτόπου	Έμμεσου προσδιορισμού	10kPa-1500kPa	Ώρες έως ημέρες
Χαρτιά φίλτρου	Και τα δύο είδη	Μόνο στο εργαστήριο	Έμμεσου προσδιορισμού	10kPa-1000000kPa	Ημέρες έως εβδομάδες

Μέθοδοι ελέγχου της μύζησης

- Μέθοδοι ελέγχου της μύζησης εδαφικού σκελετού:
 - μέθοδος μετατόπισης άξονα (axis translation method)
 - ωσμωτική μέθοδος (osmotic method)
 - μέθοδος φυγοκέντρισης (centrifuge method)
 - μέθοδος ταπείνωσης της πίεσης της υγρής φάσης (hanging column method)
- Μέθοδοι ελέγχου της ολικής μύζησης:
 - μέσω ελέγχου της σχετικής υγρασίας: παθητικά μέσω υδατικών διαλυμάτων αλάτων ή οξέων, ή ενεργητικά μέσω ελέγχου της αναλογίας απολύτως ξηρού και πλήρως κορεσμένου σε υδρατμούς αέρα

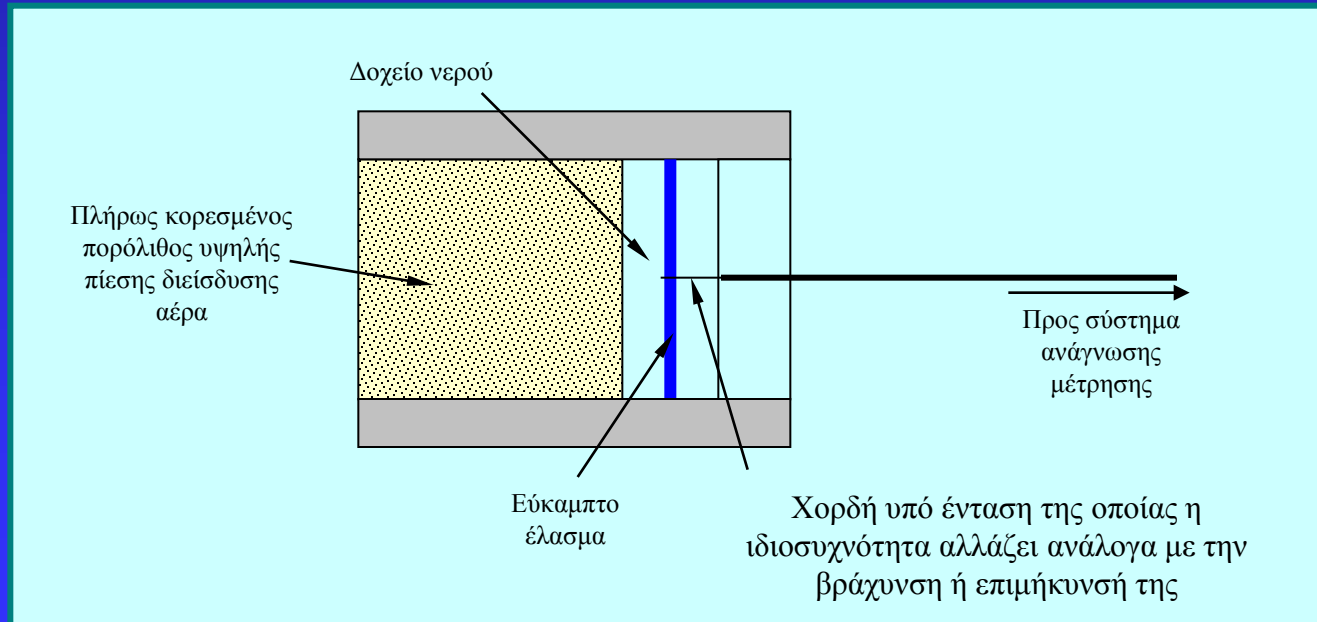
Μέθοδοι ελέγχου της μύζησης

Μέθοδος	Είδος μύζησης που ελέγχεται	Πίεση της αέριας φάσης	Πίεση της υγρής φάσης	Εύρος ελέγχου της μύζησης (kPa)
Μετατόπισης άξονα	Μύζηση εδαφικού σκελετού	Θετική, υψηλότερη της ατμοσφαιρικής	Ατμοσφαιρική	0-1500 (κεραμικοί πορόλιθοι) 0-10000 (μεμβράνες σελουλόζης)
Ωσμωτική	Μύζηση εδαφικού σκελετού	Ατμοσφαιρική	Πραγματικά αρνητική	100-20000
Φυγοκέντρισης	Μύζηση εδαφικού σκελετού	Ατμοσφαιρική	Πραγματικά αρνητική	0-2800
Ταπείνωσης της πίεσης του νερού των πόρων	Μύζηση εδαφικού σκελετού	Ατμοσφαιρική	Μικρότερη της ατμοσφαιρικής	0-80
Ελέγχου σχετικής υγρασίας	Ολική μύζηση	Ατμοσφαιρική	Πραγματικά αρνητική	500-350000 (με υδατικά διαλύματα) 7000-800000 (με ανεξάρτητο έλεγχο πίεσης ξηρών και κορεσμένων σε υδρατμούς αερίων)

Πιεζόμετρα δονούμενης χορδής

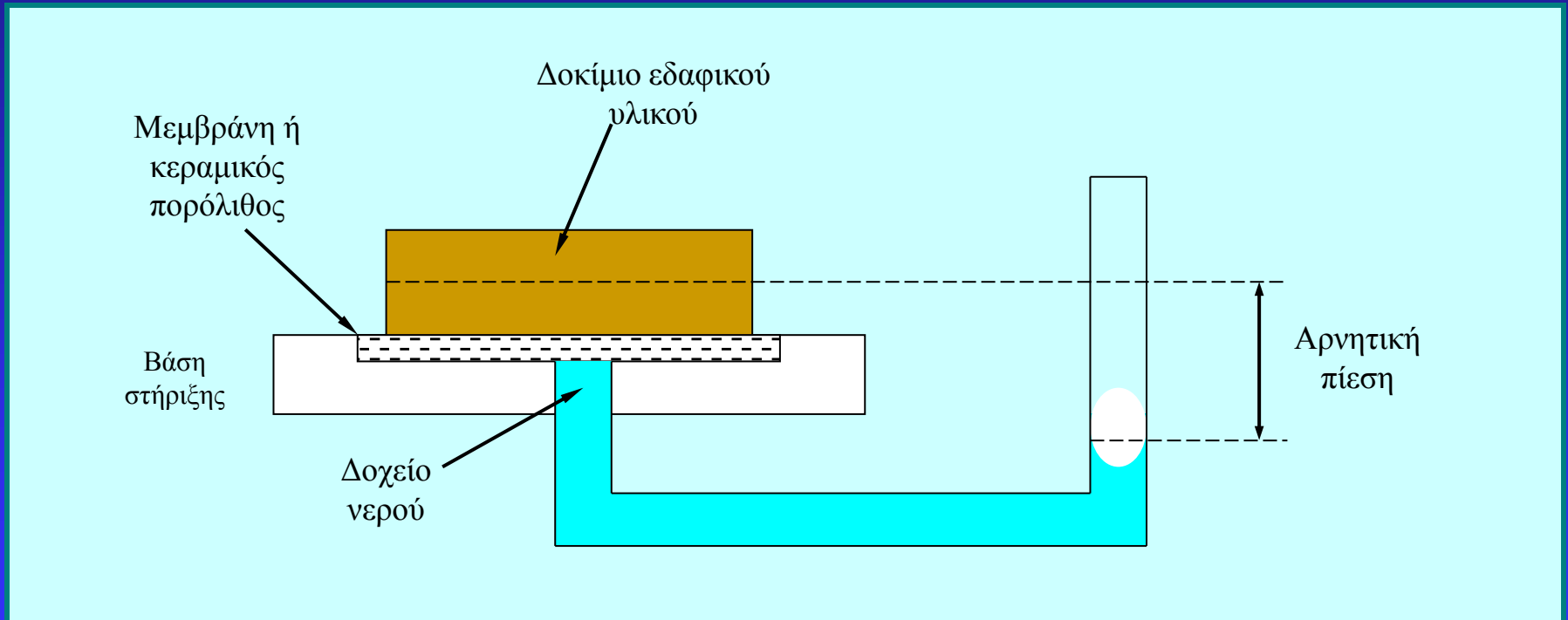


Τα όργανα αυτά μπορούν να μετρήσουν αρνητική πίεση πόρων και μύζηση (συνήθως μέχρι 100 kPa που είναι και η πίεση διείσδυσης αέρα του κεραμικού πορολίθου) αλλά οι μετρήσεις τους επηρεάζονται έντονα από ηλεκτρομαγνητικά σήματα



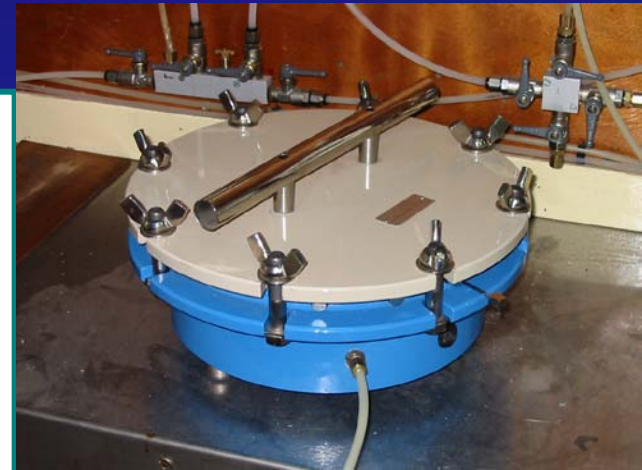
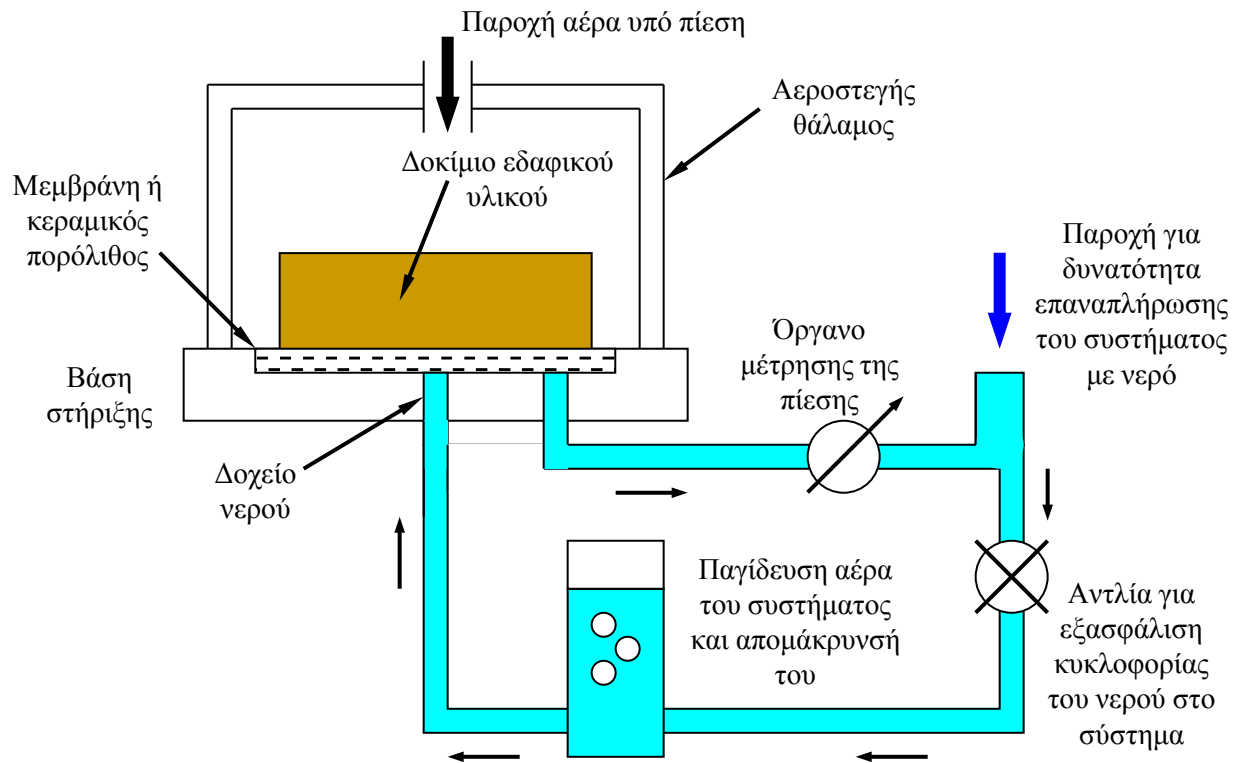
Τενσιόμετρα (tensiometers)

Η μέθοδος ελέγχου της μύζησης με ταπείνωση της πίεσης του νερού των πόρων (παραλλαγή της μεθόδου χρησιμοποιείται και για την μέτρηση)



Τενσιόμετρα (tensiometers)

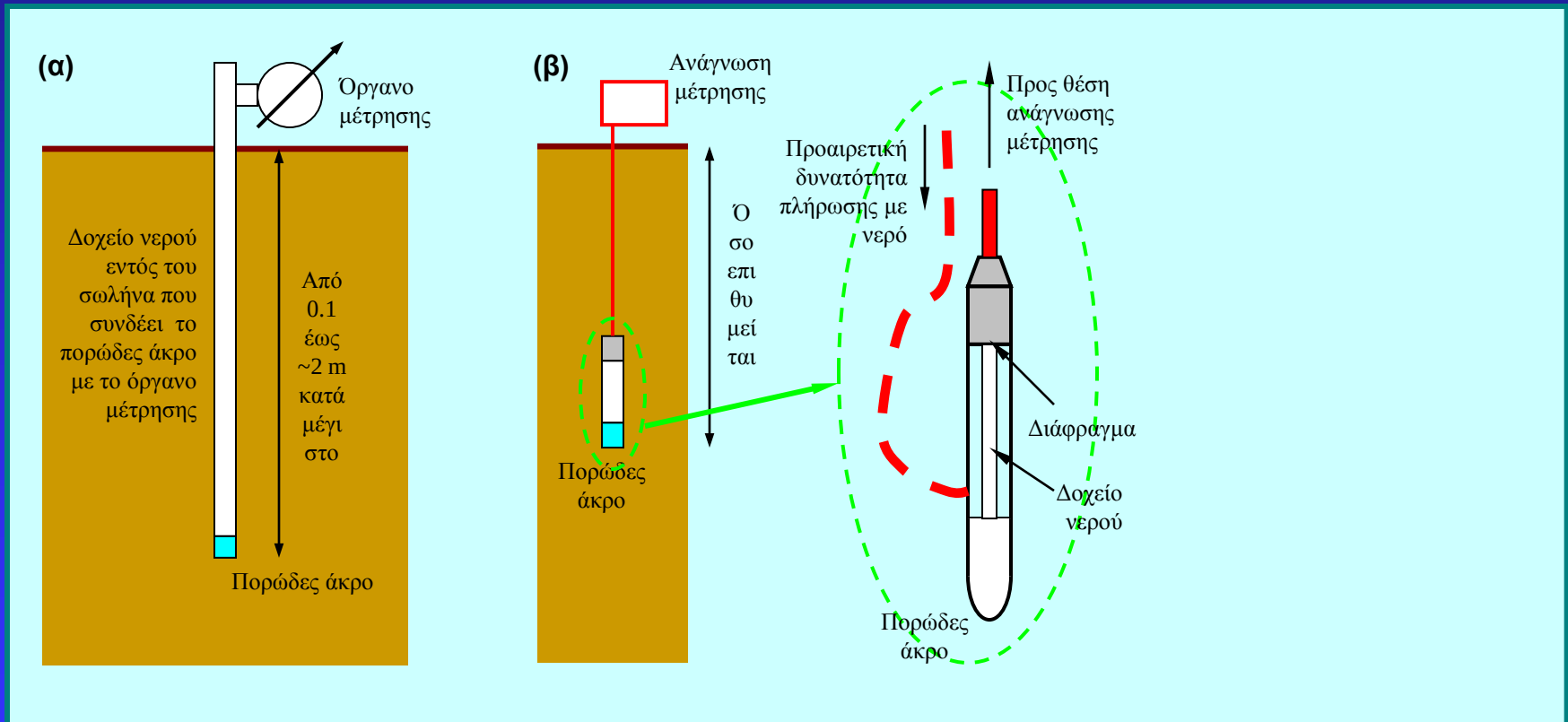
Αν η μύζηση γίνει πιο μεγάλη;



Αν μικρύνουμε τον πορόλιθο και τον βάλουμε μέσα στο έδαφος;

Τενσιόμετρα (tensiometers)

Αν αντί να είναι ο πορόλιθος μεγάλος και το δείγμα μικρό, είναι ο πορόλιθος μικρός και για «δείγμα» χρησιμοποιούμε το έδαφος επιτόπου μέσα στο οποίο βάζουμε τον πορόλιθο;



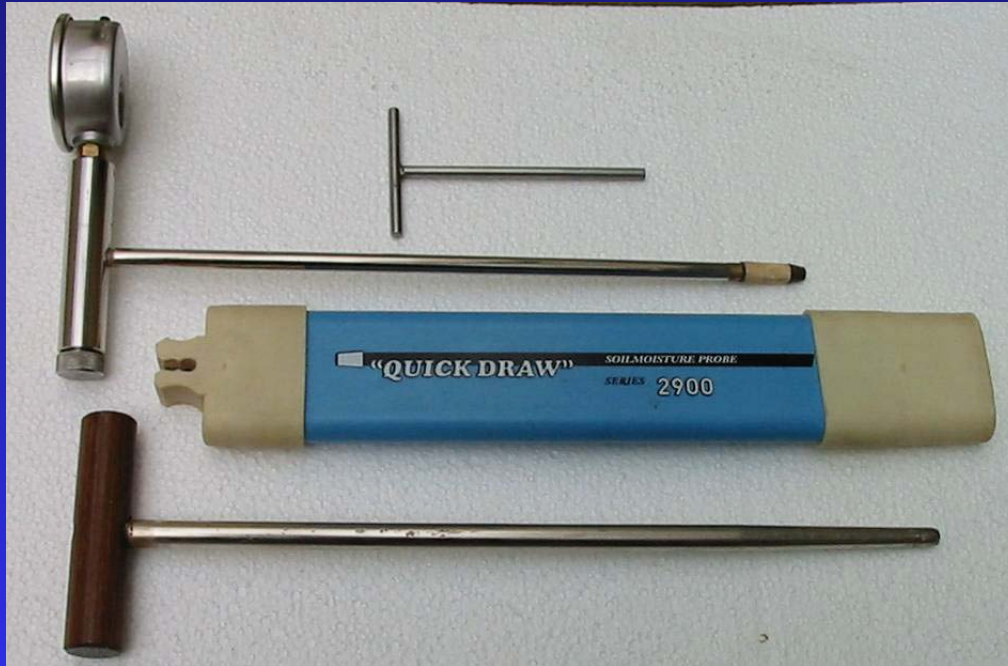
Η μέτρηση της μύζησης

Τενσιόμετρα – Τενσιόμετρα μόνιμης εγκατάστασης



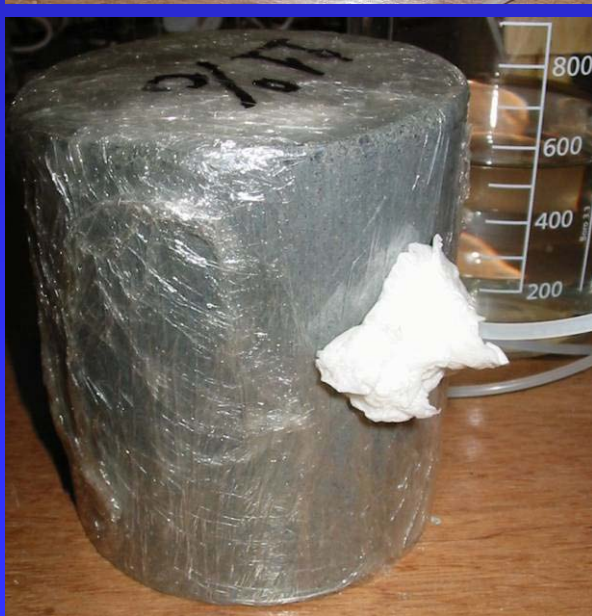
Η μέτρηση της μύζησης

Τενσιόμετρα – Τενσιόμετρα τύπου Quickdraw



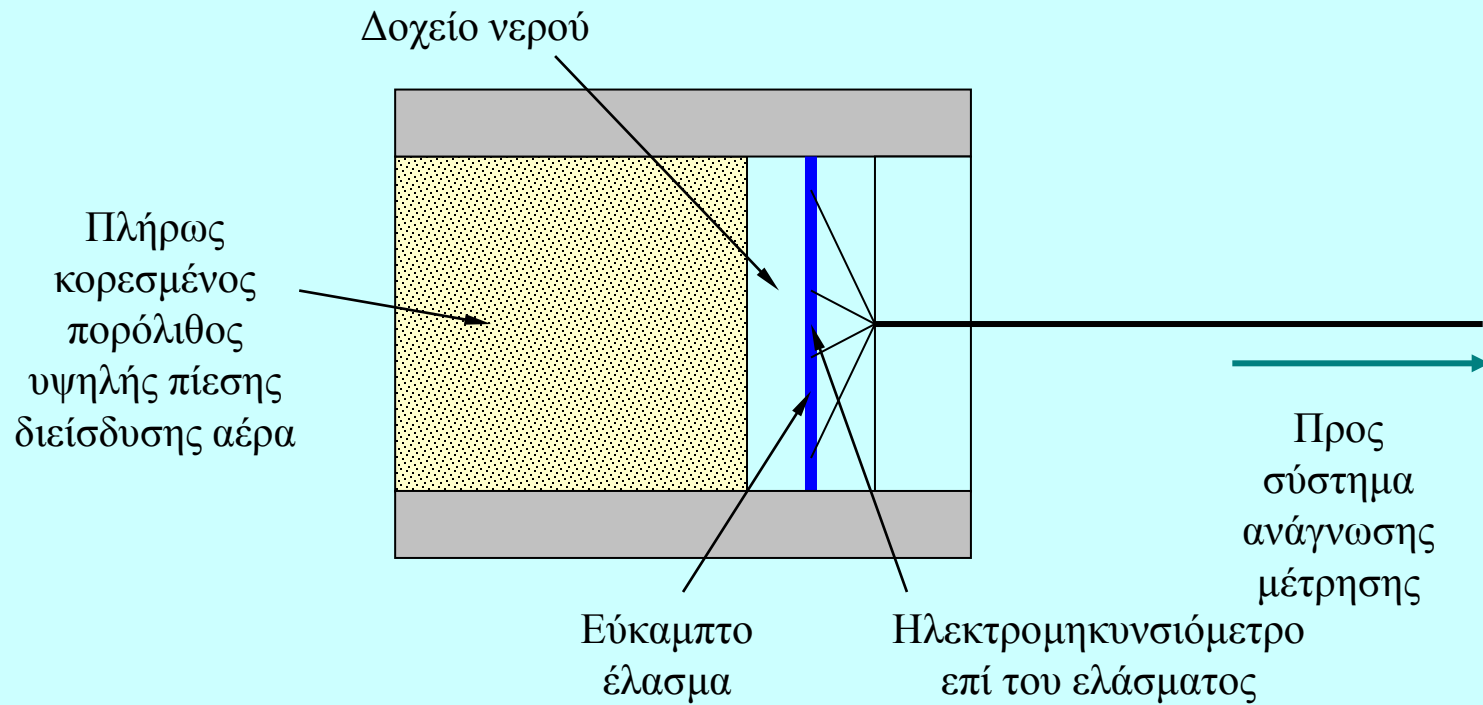
Η μέτρηση της μύζησης

Τενσιόμετρα – Εργαστηριακά τενσιόμετρα



Η μέτρηση της μύζησης

Τενσιόμετρα – Τενσιόμετρα πορολίθου υψηλής πίεσης διείσδυσης αέρα



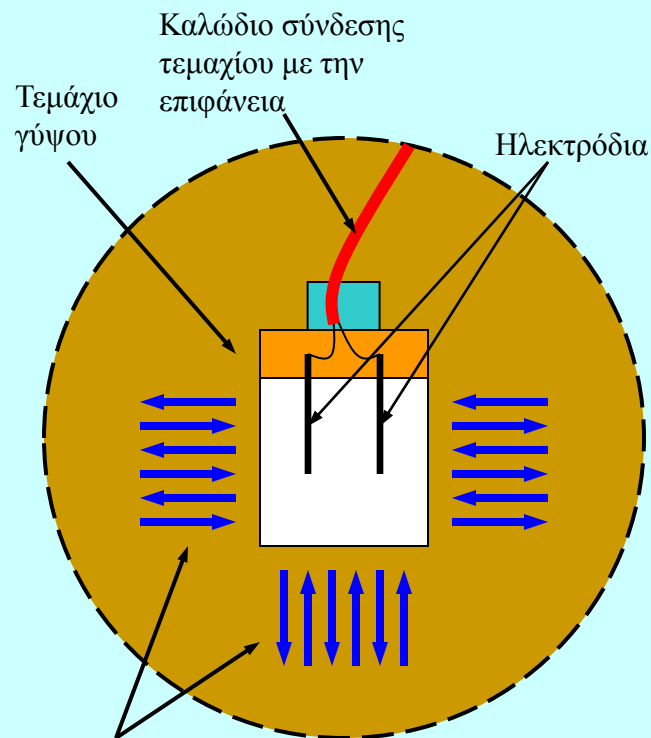
Η μέτρηση του ποσοστού υγρασίας



Η μέτρηση της μύζησης Τεμάχια πορωδών υλικών – Τεμάχια τύπου Βουγουκος



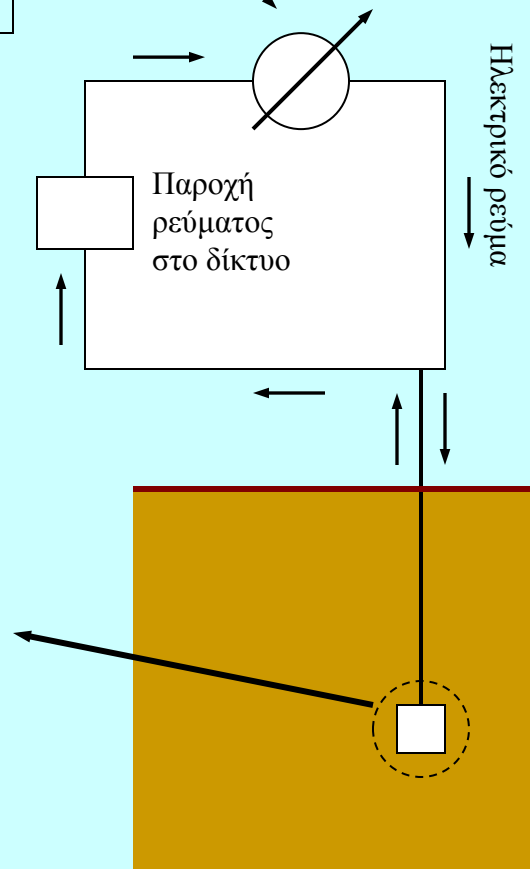
Στάδιο 1. Τεμάχιο γύψου τοποθετείται επιμελώς σε επαφή με εδαφικό υλικό (δοκίμιο ή φυσικό έδαφος επιτόπου όπως φαίνεται στο σχήμα).



Κίνηση ύδατος από το τεμάχιο γύψου στο περιβάλλον έδαφος και αντίστροφα μέχρι την επίτευξη υδραυλικής ισορροπίας

Στάδιο 2. Μετρείται η ηλεκτρική αντίσταση του τεμαχίου γύψου μετά την επίτευξη υδραυλικής ισορροπίας μεταξύ τεμαχίου γύψου και περιβάλλοντος εδάφους.

Μέτρηση ηλεκτρικής αντίστασης



Στάδιο 3. Η ηλεκτρική αντίσταση του τεμαχίου γύψου συσχετίζεται με το ποσοστό υγρασίας του τεμαχίου γύψου και αυτό με την μύζηση.

Η μέτρηση της μύζησης Τεμάχια πορωδών υλικών – Τεμάχια τύπου Βουγουκος

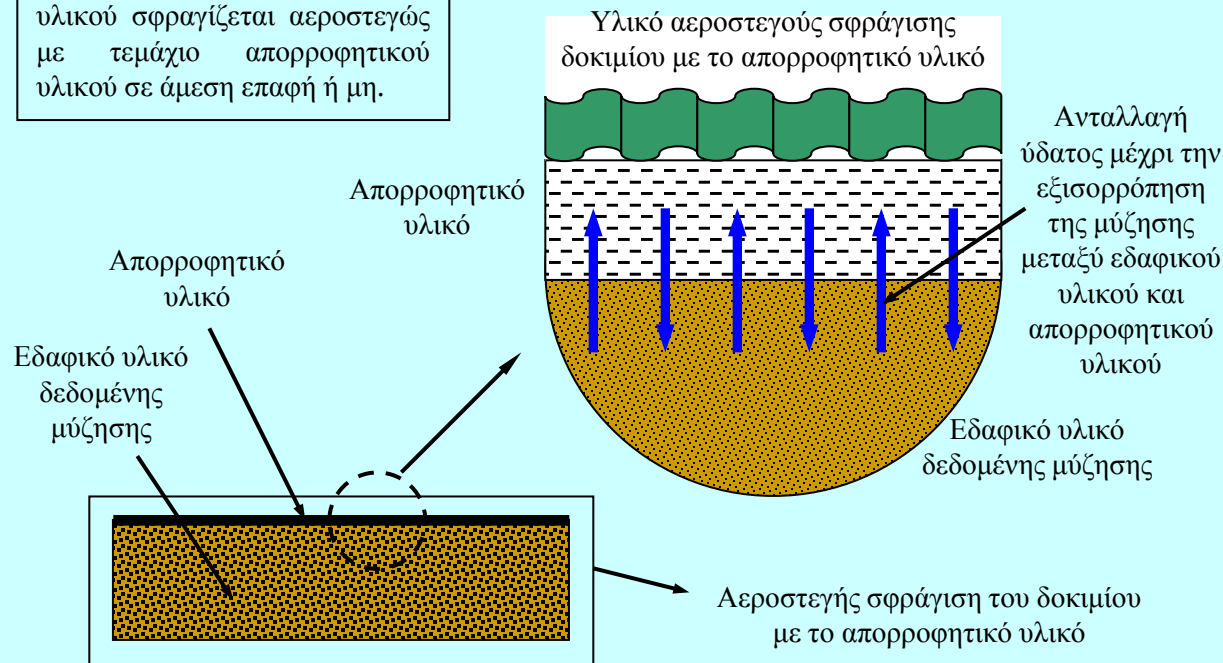


Η μέτρηση της μύζησης

Η μέθοδος των χαρτιών φίλτρου (Filter paper method)



Στάδιο 1. Δοκίμιο εδαφικού υλικού σφραγίζεται αεροστεγώς με τεμάχιο απορροφητικού υλικού σε άμεση επαφή ή μη.



Στάδιο 2. Το δοκίμιο του εδαφικού υλικού αφήνεται για το απαιτούμενο χρονικό διάστημα σφραγισμένο με το τεμάχιο απορροφητικού υλικού μέχρι την εξισορρόπηση της μύζησης μεταξύ των δύο υλικών.

Στάδιο 3. Το δοκίμιο με το τεμάχιο απορροφητικού υλικού αποσφραγίζονται και υπολογίζεται το ποσοστό υγρασίας του απορροφητικού υλικού. Από αυτό υπολογίζεται η μύζησή του απορροφητικού υλικού που λόγω επίτευξης ισορροπίας είναι η ίδια με εκείνη του δοκιμίου.

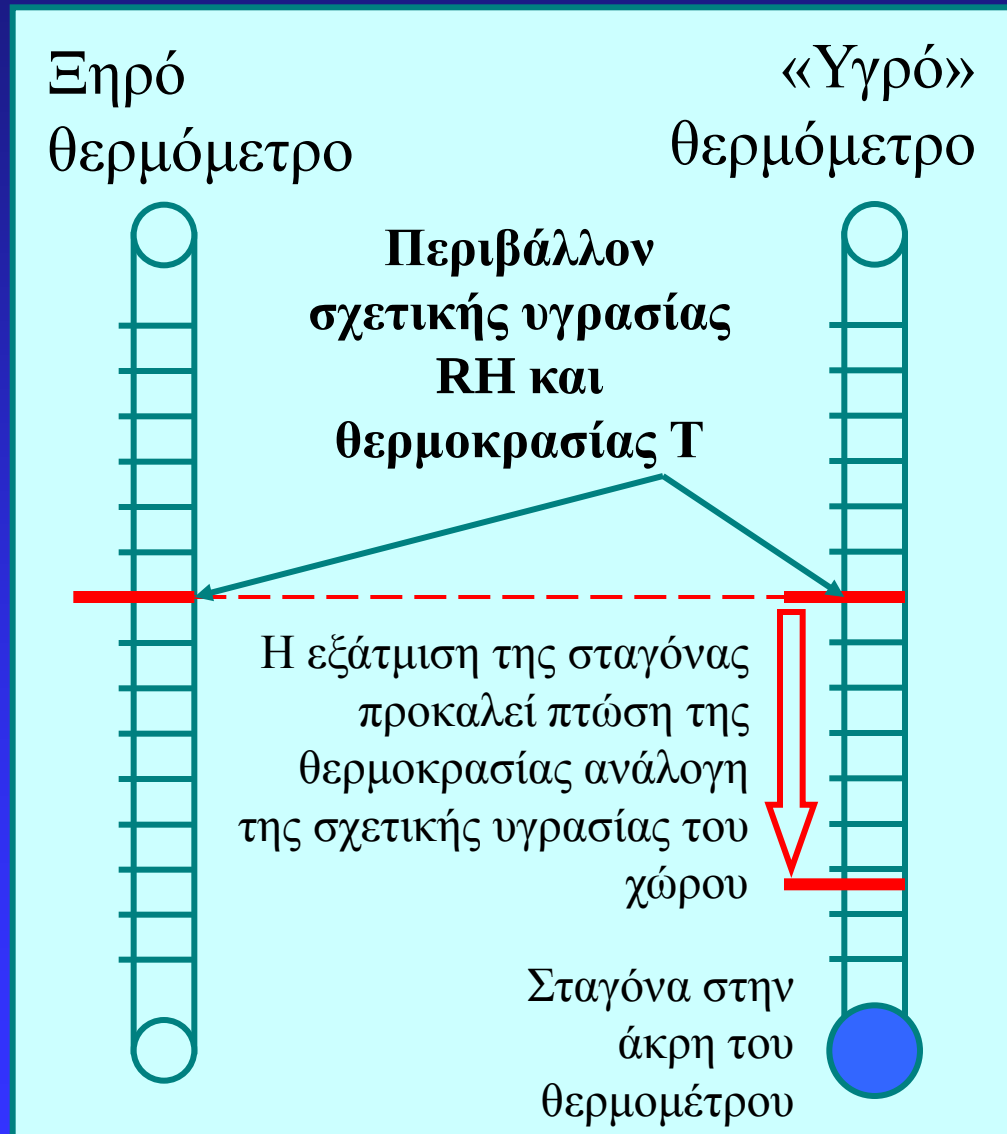
Εξισώσεις προταθεισών «καμπυλών βαθμονόμησης» χαρτιών φίλτρου

Βιβλιογραφική αναφορά	Τύπος χαρτιού φίλτρου	Εύρος τιμών ποσοστού υγρασίας χαρτιού φίλτρου		Εξίσωση ⁵
Fawcett & Collis-George (1967)	W42 ¹	$w_{fp} < 43$ $w_{fp} > 43$		$\log s = 4.777 - 0.0600 w_{fp}$ $\log s = 2.271 - 0.0230 w_{fp}$
McQueen & Miller (1968)	S&S 589 ²	$w_{fp} < 54$ $w_{fp} > 54$		$\log s = 5.246 - 0.0723 w_{fp}$ $\log s = 1.895 - 0.0103 w_{fp}$
Al-Khafaf & Hanks (1974)	S&S 589	$w_{fp} < 83$ $w_{fp} > 83$		$\log s = 5.117 - 0.0337 w_{fp}$ $\log s = 1.983 - 0.0090 w_{fp}$
McKeen (1980)	S&S 589	$w_{fp} < 66\%$ $w_{fp} > 66\%$		$\log s = 4.900 - 0.0624 w_{fp}$ $\log s = 1.250 - 0.0069 w_{fp}$
Hamblin (1981)	W42			$\log s = 5.281 - 0.0822 w_{fp}$
Chandler & Gutierrez (1986)	W42			$\log s = 4.850 - 0.0622 w_{fp}$
Greacen et al (1987)	S&S 589 W42	$w_{fp} < 54\%$ $w_{fp} > 54\%$ $w_{fp} < 45.3\%$ $w_{fp} > 45.3\%$		$\log s = 5.058 - 0.0688 w_{fp}$ $\log s = 1.882 - 0.0102 w_{fp}$ $\log s = 5.327 - 0.0780 w_{fp}$ $\log s = 2.413 - 0.0135 w_{fp}$
Chandler et al (1992)	W42	$w_{fp} < 47\%$ $w_{fp} > 47\%$		$\log s = 4.842 - 0.0622 w_{fp}$ $\log s = 6.050 - 2.48 \log w_{fp}$
Miller & Nelson (1992)	TS 4705-F10 ³	$w_{fp} < 43\%$		$\log s = 4.883 - 0.0599 w_{fp}$
Jiang et al. (2000)	SQ 202 ⁴	$w_{fp} > 30\%$		$\log s = 3.663 - 0.0147 w_{fp}$
Bulut et al. (2000α)	S&S 589	$w_{fp} > 25\%$		$\log s = 1.1247 w_{fp}^{-0.8473}$
Leong et al. (2002)	W42	Μύζηση εδαφικού σκελετού	$w_{fp} < 47\%$ $w_{fp} > 47\%$	$\log s = 4.945 - 0.0673 w_{fp}$ $\log s = 2.909 - 0.0229 w_{fp}$
		Ολική μύζηση	$w_{fp} < 26\%$ $w_{fp} > 26\%$	$\log s = 5.310 - 0.3010 w_{fp}$ $\log s = 8.778 - 0.2220 w_{fp}$

¹ W42: Whatman No. 42, ² S&S 589: Schleicher & Schuell No. 589, ³ TS 4705-F10: Thomas Scientific 4705-F10, ⁴ SQ 202: ShuangQuan No. 202, ⁵ Η μύζηση είναι σε kPa και ο λογάριθμος είναι δεκαδικός.

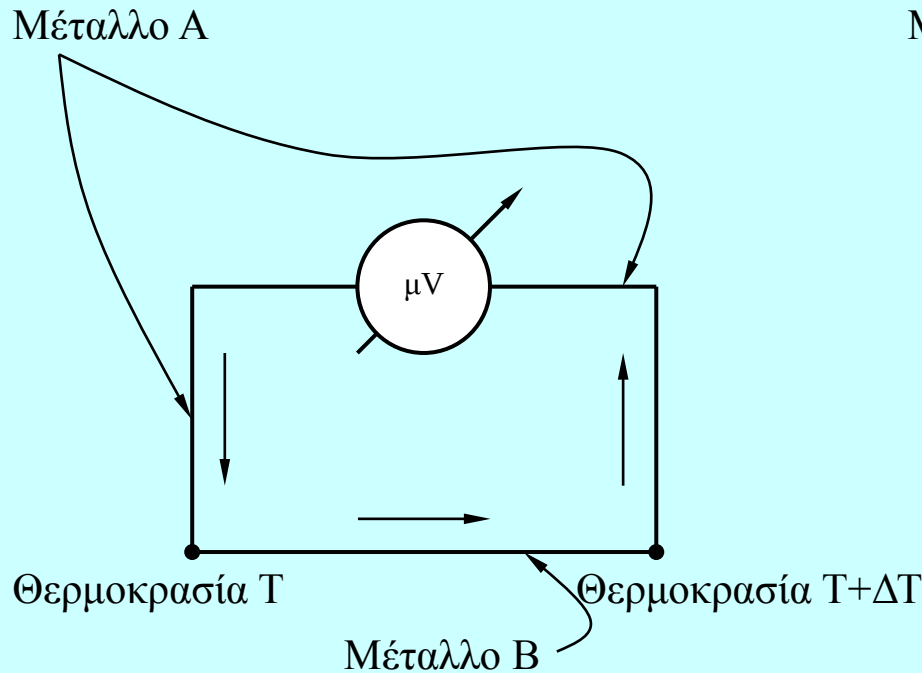
Η μέτρηση της ολικής μύζησης (total suction) - Ψυχρόμετρα

Βασική αρχή της ψυχομετρίας

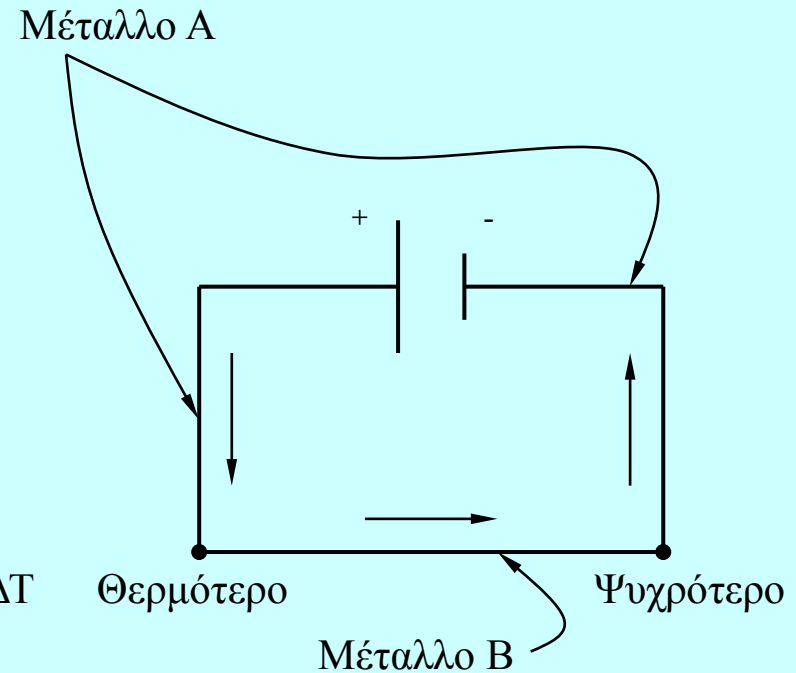


Η μέτρηση της ολικής μύζησης (total suction) - Ψυχρόμετρα

Σχηματική απεικόνιση ηλεκτρικών κυκλωμάτων διαφορετικών μετάλλων προς επίδειξη α) του φαινομένου Seebeck, και β) του φαινομένου Peltier



α) **Φαινόμενο Seebeck:** Η επιβαλλόμενη διαφορά θερμοκρασίας προκαλεί τη διέλευση ενός ηλεκτρικού ρεύματος στο κύκλωμα

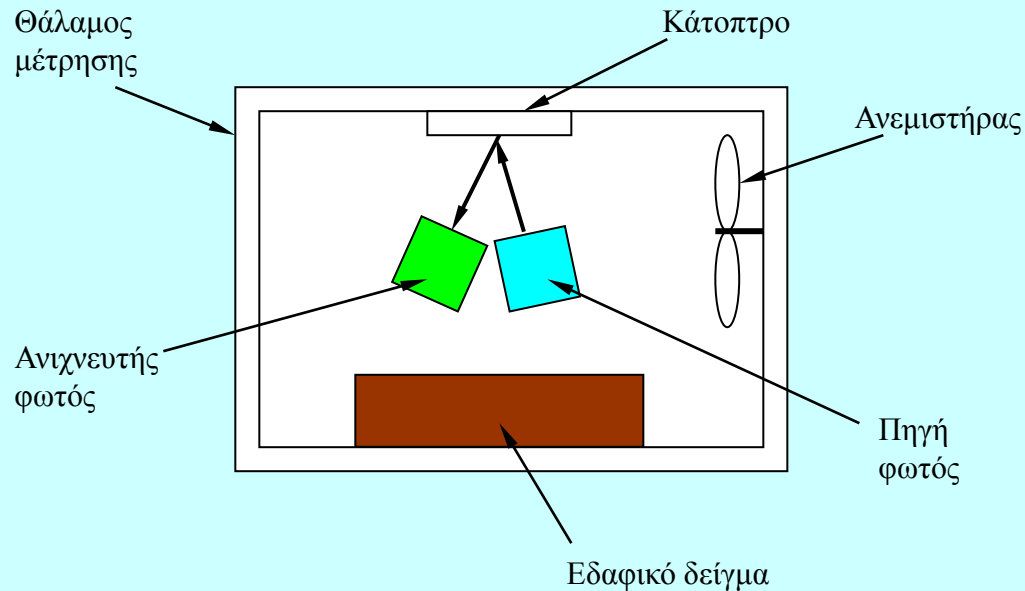


β) **Φαινόμενο Peltier:** Η επιβαλλόμενη τάση προκαλεί τη διέλευση ενός ηλεκτρικού ρεύματος που προκαλεί μεταβολή θερμοκρασίας στο κύκλωμα

Η μέτρηση της ολικής μύζησης (total suction) - Ψυχρόμετρα

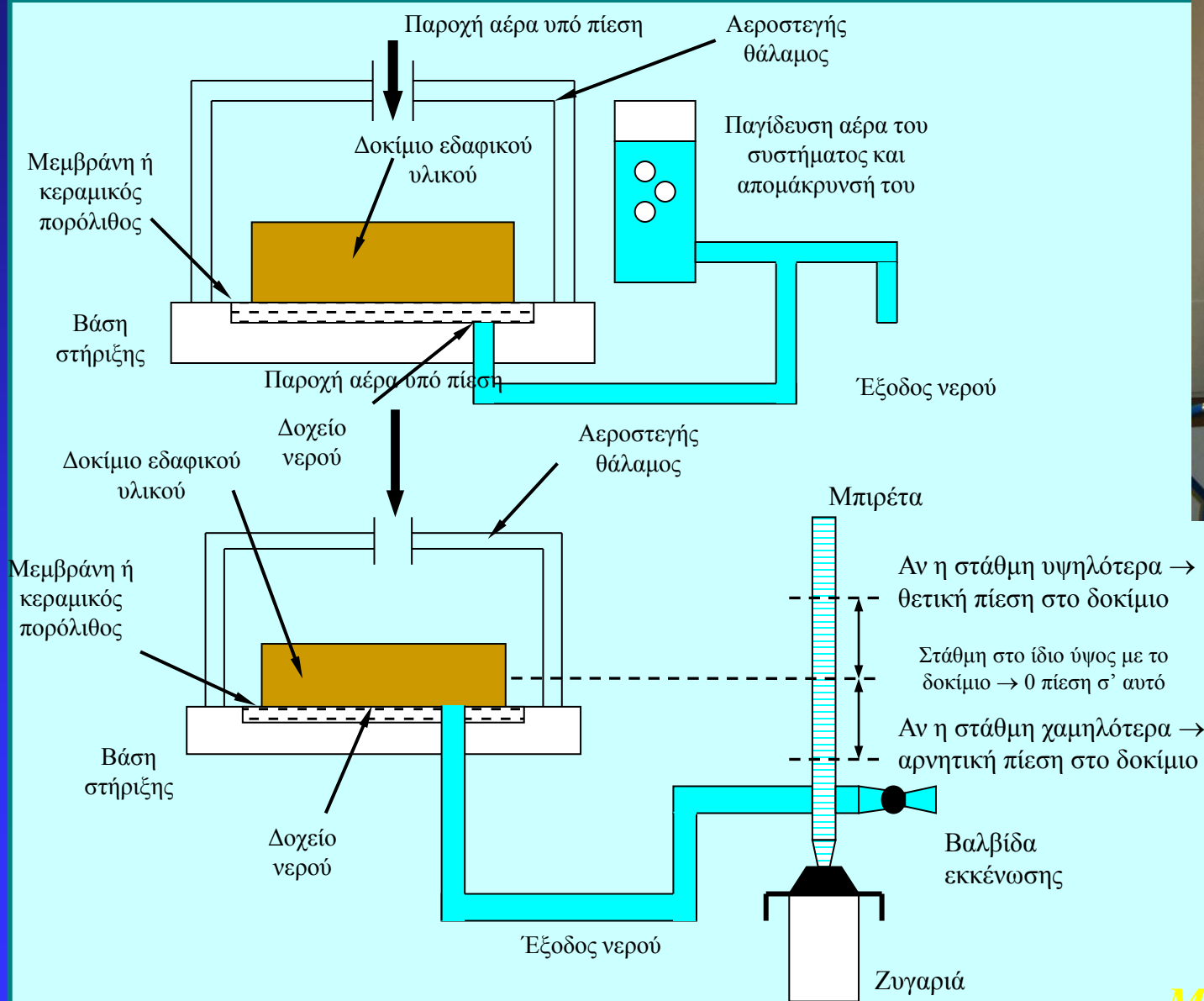
Μέθοδος	Μέτρηση μύζησης στο εργαστήριο	Μέτρηση μύζησης επιτόπου	Εύρος μέτρησης μύζησης	Τάξη μεγέθους χρόνου επίτευξης μέτρησης
Ψυχρόμετρα θερμικά ευαίσθητης αντίστασης	NAI	OXI	100 – 70000 kPa	Λεπτά της ώρας έως μία ώρα
Ψυχρόμετρα θερμικού ζεύγους	NAI	NAI	100 – 8000 kPa	Λεπτά της ώρας έως μία ώρα
Υγρόμετρα σημείου δρόσου	NAI	NAI	100 – 8000 kPa	Λεπτά της ώρας έως μία ώρα
Υγρόμετρα ψυχρού κατόπτρου	NAI	OXI	100 – 300000 kPa	Λεπτά της ώρας
Αισθητήρες αντίστασης/χωρητικότητας πολυμερών	NAI	NAI	1000 – 1000000 kPa	Δευτερόλεπτα
Αισθητήρες οργανικών μέσων	NAI	NAI	1000 – 1000000 kPa	Λεπτά

Η μέτρηση της ολικής μύζησης (total suction) - Ψυχρόμετρα Υγρόμετρα ψυχρού κατόπτρου (chilled mirror hygrometers)

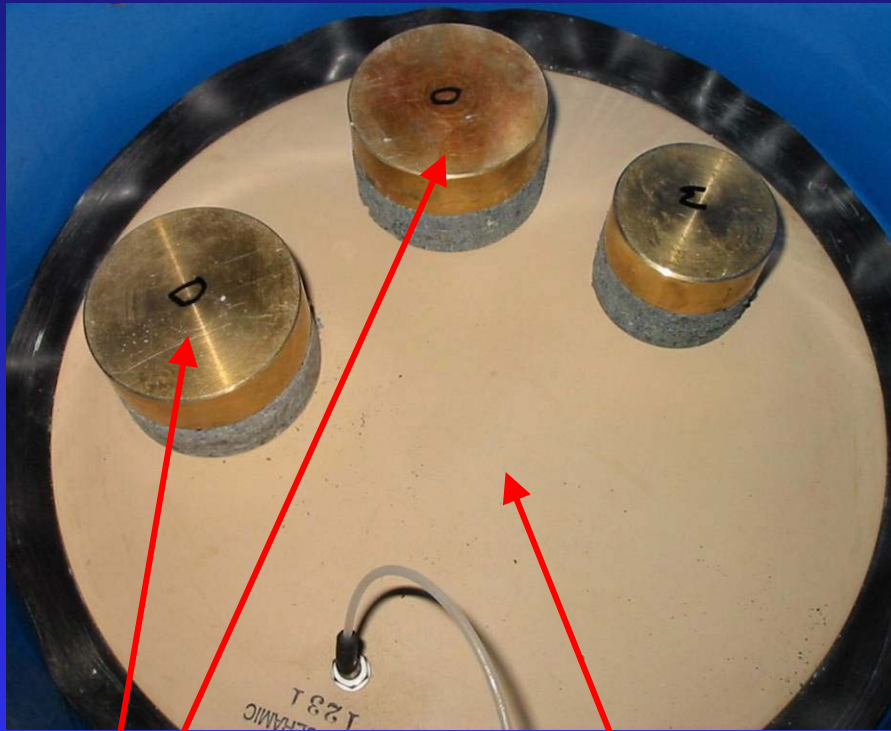


Ο έλεγχος της μύζησης εδαφικού σκελετού (matrix suction)

Οι θάλαμοι μύζησης (pressure extractors)



Ο έλεγχος της μύζησης εδαφικού σκελετού (matrix suction) Οι θάλαμοι μύζησης (pressure extractors)



Κεραμικός πορόλιθος πολύ υψηλής πίεσης
διείσδυσης αέρα (1500 kPa)

Βάρη πάνω από τα δοκίμια για να
εξασφαλίζεται καλή υδραυλική επαφή
δοκιμίου-κεραμικού πορολίθου

Ο έλεγχος της μύζησης εδαφικού σκελετού (matrix suction) Οι θάλαμοι μύζησης (pressure extractors)

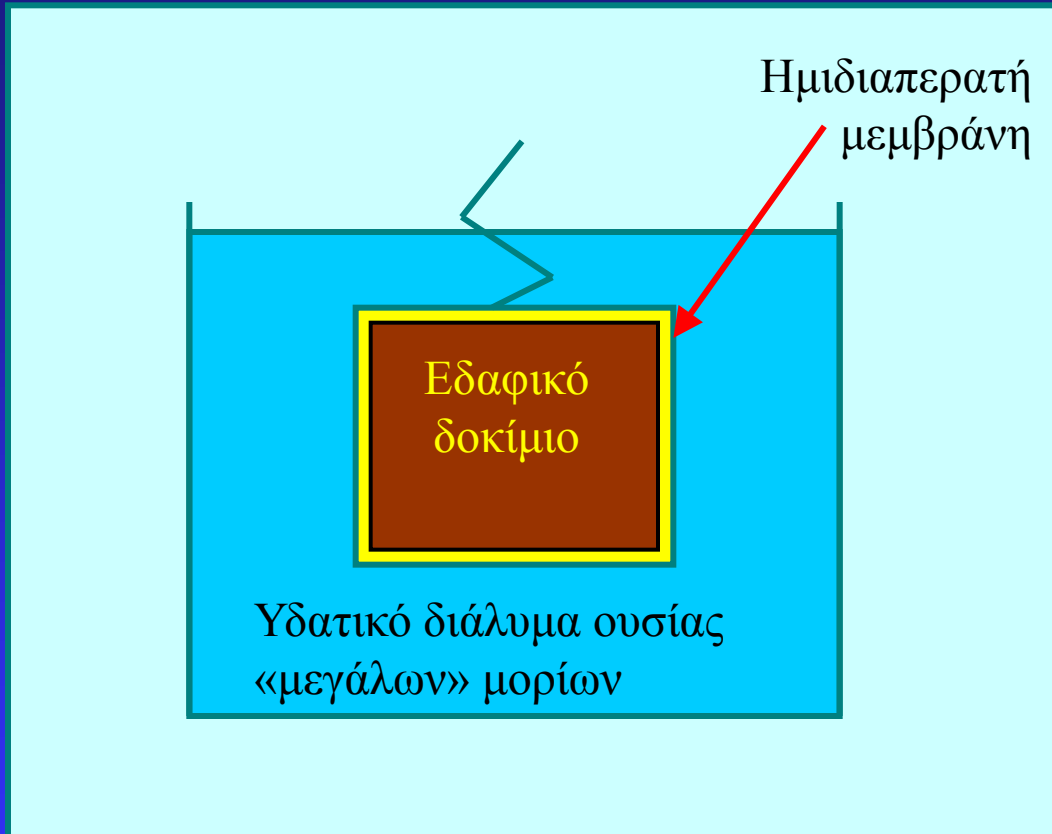


Με την κατάλληλη διάταξη και για
αναζυμωμένα εδάφη

Ο έλεγχος της μύζησης εδαφικού σκελετού (matrix suction)
Οι μικροί θάλαμοι μύζησης με πορολίθους πίεσης
διείσδυσης αέρα 100 kPa (Tempe cells)



Ο έλεγχος της μύζησης εδαφικού σκελετού (matrix suction) Ωσμωτική μέθοδος

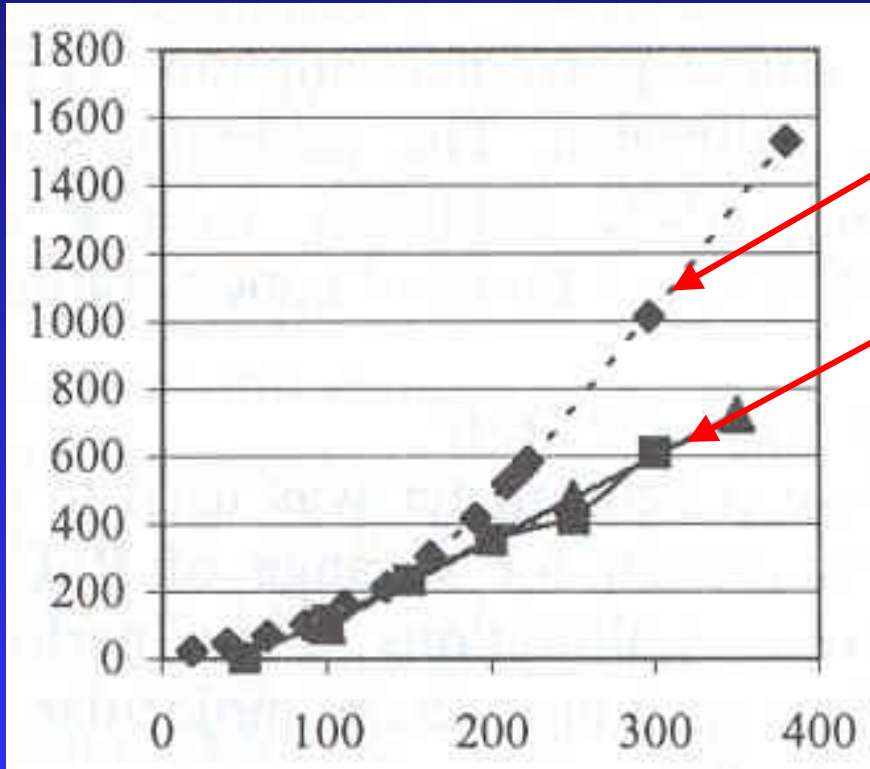


Εάν ένα εδαφικό δοκίμιο διαχωρίζεται από ένα υδατικό διάλυμα ουσίας «μεγάλων» μορίων με ημιδιαπερατή μεμβράνη (διαπερατή από το νερό μόνο, όχι από τα «μεγάλα» μόρια), τότε νερό θα αρχίσει να διαφεύγει από το δοκίμιο προς το διάλυμα δημιουργώντας μία μύζηση εδαφικού σκελετού ανάλογη της συγκέντρωσης του διαλύματος

Προσοχή! Χρειάζεται συνεχής ανάδευση του διαλύματος!

Ο έλεγχος της μύζησης εδαφικού σκελετού (matrix suction) Ωσμωτική μέθοδος

Μύζηση (kPa)



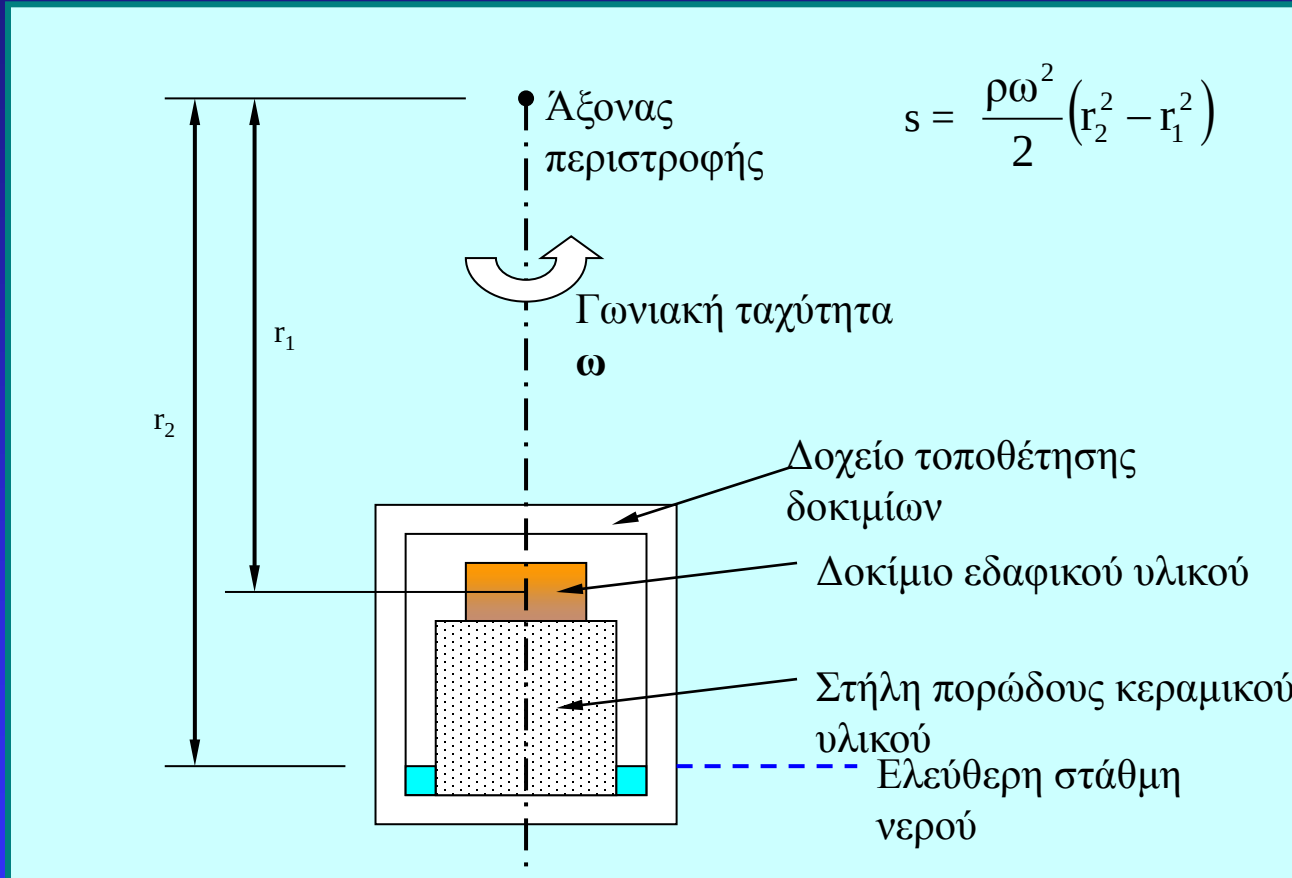
PEG 6000

PEG 20000
και 35000

Έχουν επιτευχθεί τιμές μύζησης εδαφικού σκελετού μέχρι και 20 MPa (οι μεγαλύτερες που έχουν καταγραφεί), αλλά είναι αρκετά δυσεύρετα και το PEG μεγάλου μοριακού βάρους και οι ημιδιαπερατές μεμβράνες

Συγκέντρωση διαλύματος σε PEG (g PEG/l)

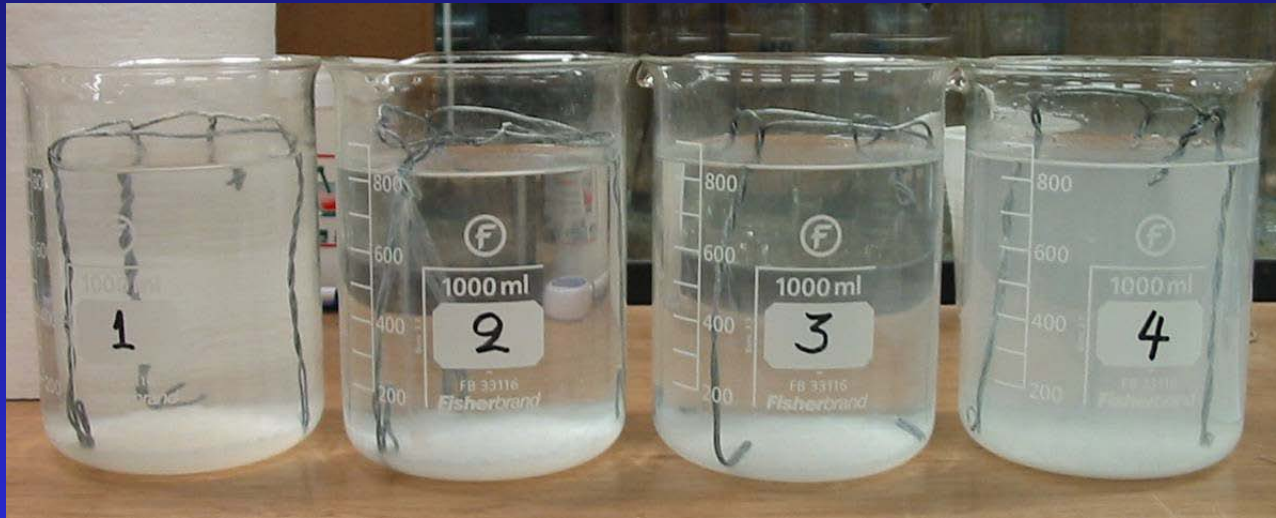
Ο έλεγχος της μύζησης εδαφικού σκελετού (matrix suction) Μέθοδος φυγοκέντρισης



Αυτή η μέθοδος είναι γενικά πιο γρήγορη (ακόμα και μόλις 2 ημέρες σε φυγοκεντριστή πολλών θέσεων).

Μπορεί να εφαρμοστεί σε έναν κοινό φυγοκεντριστή ιατρικών εφαρμογών.

Ο έλεγχος της ολικής μύζησης (total suction) Οι θάλαμοι υδατικών διαλυμάτων



Καθαρό νερό σε
κλειστό περιβάλλον
δημιουργεί
 $RH=100\%$

Διαλύματα ουσιών σε
κλειστό περιβάλλον
δημιουργούν
 $RH < 100\%$ - Δοκίμια
εδάφους εντός αυτών
των θαλάμων αποκτούν
την αντίστοιχη ολική
μύζηση



Ο έλεγχος της ολικής μύζησης (total suction)

Οι θάλαμοι υδατικών διαλυμάτων

- Η σχετική υγρασία που δημιουργείται σε κλειστό περιβάλλον είναι ανάλογη της συγκέντρωσης της διαλυμένης ουσίας, μέχρι το διάλυμα να γίνει κορεσμένο οπότε σταθεροποιείται.
- Συνήθως χρησιμοποιούνται διαλύματα αλάτων (πιο ασφαλή) ή οξέων (λιγότερο ασφαλή).
- Τα διαλύματα οξέων προτιμώνται όταν τα διαλύματα είναι ακόρεστα και η συγκέντρωση του οξέος ελέγχεται προκειμένου μέσω του ίδιου διαλύματος να επιβάλλονται διαφορετικές τιμές μύζησης στο ίδιο δοκίμιο.
- Τα διαλύματα αλάτων προτιμώνται όταν κάθε διάλυμα επιβάλλει μία τιμή της μύζησης μόνο. Επιλέγεται τότε τα διαλύματα να είναι κορεσμένα ώστε οι μεταβολές στην ποσότητα του διαλύτη να μην παίζουν ρόλο στην δημιουργούμενη σχετική υγρασία και άρα στην δημιουργούμενη ολική μύζηση.

Ο έλεγχος της ολικής μύζησης (total suction)

Οι θάλαμοι υδατικών διαλυμάτων – Ολική μύζηση διαφόρων διαλυμάτων (ακόρεστων και κορεσμένων)

Ολική μύζηση
διαλυμάτων NaCl σε
διάφορες θερμοκρασίες
και συγκεντρώσεις

(M)	15 °C	25 °C	35 °C
0	0	0	0
0.2	884	915	946
0.5	2200	2281	2362
0.7	3091	3210	3328
1.0	4459	4640	4815
1.5	6837	7134	7411
1.7	7820	8170	8490
1.8	8330	8700	9040
1.9	8840	9240	9600
2.0	9360	9780	10160

Ολική μύζηση κορεσμένων διαλυμάτων
διαλυμάτων και συγκέντρωση επίτευξης
κορεσμού τους

Διάλυμα	Σχετική υγρασία (25° C)	Μύζηση από βιβλ/φία (25° C)	Μύζηση όπως μετρήθηκε	Συγκέντρωση επίτευξης κορεσμού διαλύματος
	(%)	(MPa)	(MPa)	(M)
K ₂ SO ₄	97.0	4.2	4.1	1
BaCl ₂ ·2H ₂ O	90.3	14.0	14.1	2
KCl	84.2	23.6	23.6	5
NaCl	75.1	39.3	39.0	6
Mg(NO ₃) ₂	52.8	87.7	85.5	9
MgCl ₂ ·6H ₂ O	32.7	153.5	151.7	15

Ο έλεγχος της ολικής μύζησης (total suction)

Οι θάλαμοι υδατικών διαλυμάτων



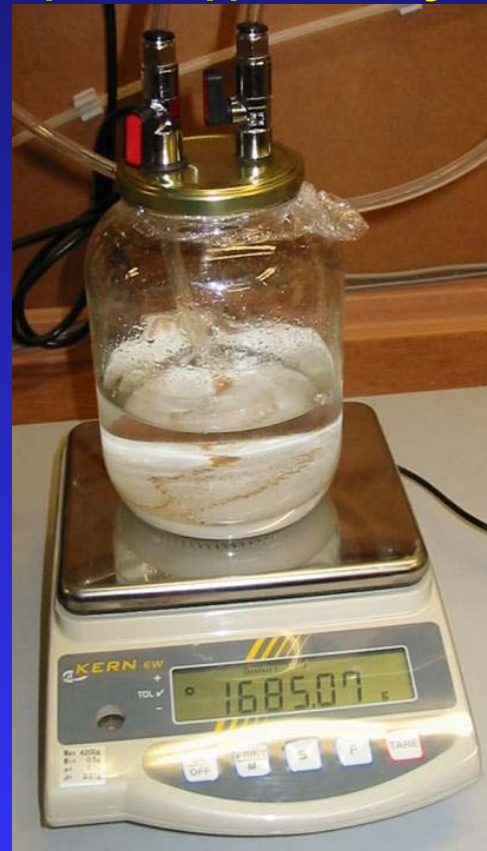
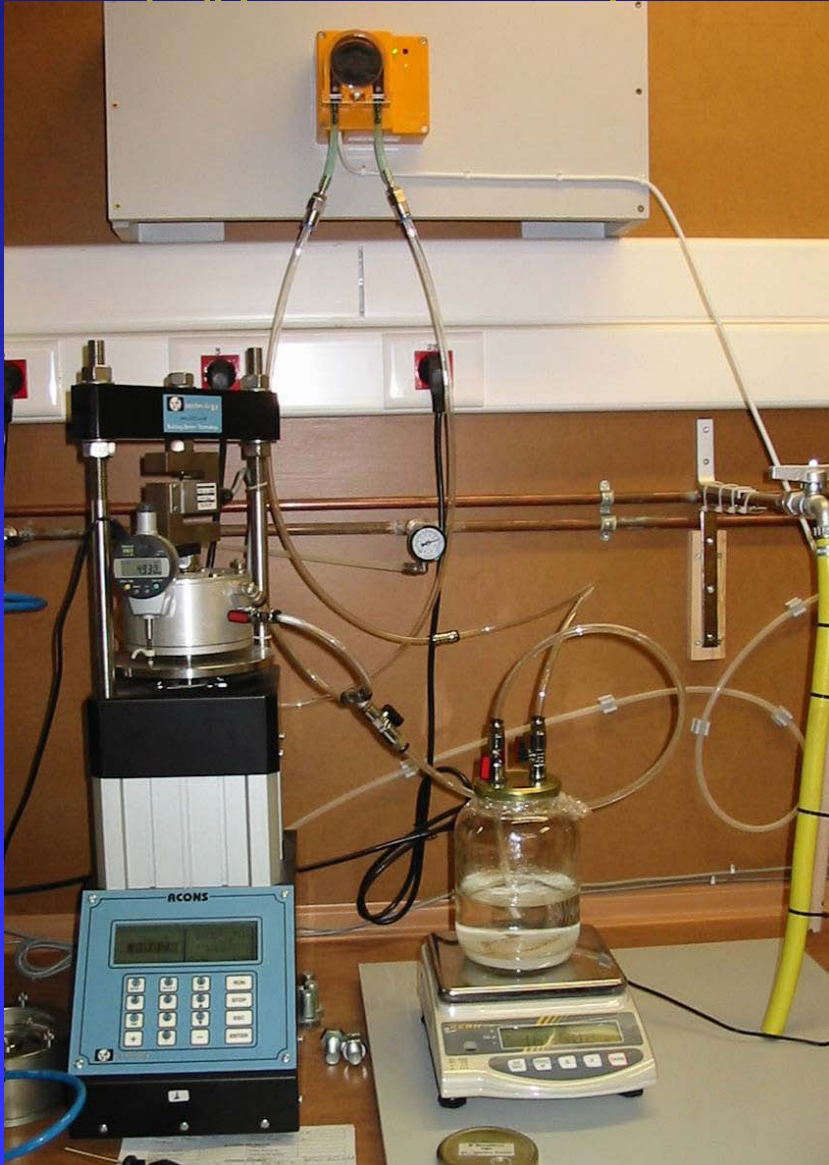
Μπορούν να τοποθετηθούν στον θάλαμο κάθε είδους δοκίμια. Ο χρόνος επίτευξης υδραυλικής ισορροπίας και άρα επιβολής της ζητούμενης μύζησης είναι ανάλογος της ποσότητας νερού που πρέπει να προσροφηθεί ή να διαφύγει.

Παράδειγμα:

Δοκίμιο βάρους 300g και ποσοστού υγρασίας 50% τοποθετείται σε θάλαμο με υδατικό διάλυμα $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$. Πόση πρέπει να είναι η συγκέντρωση του διαλύματος ώστε να μην αποκορεστεί κατά την ξήρανση του δοκιμίου;

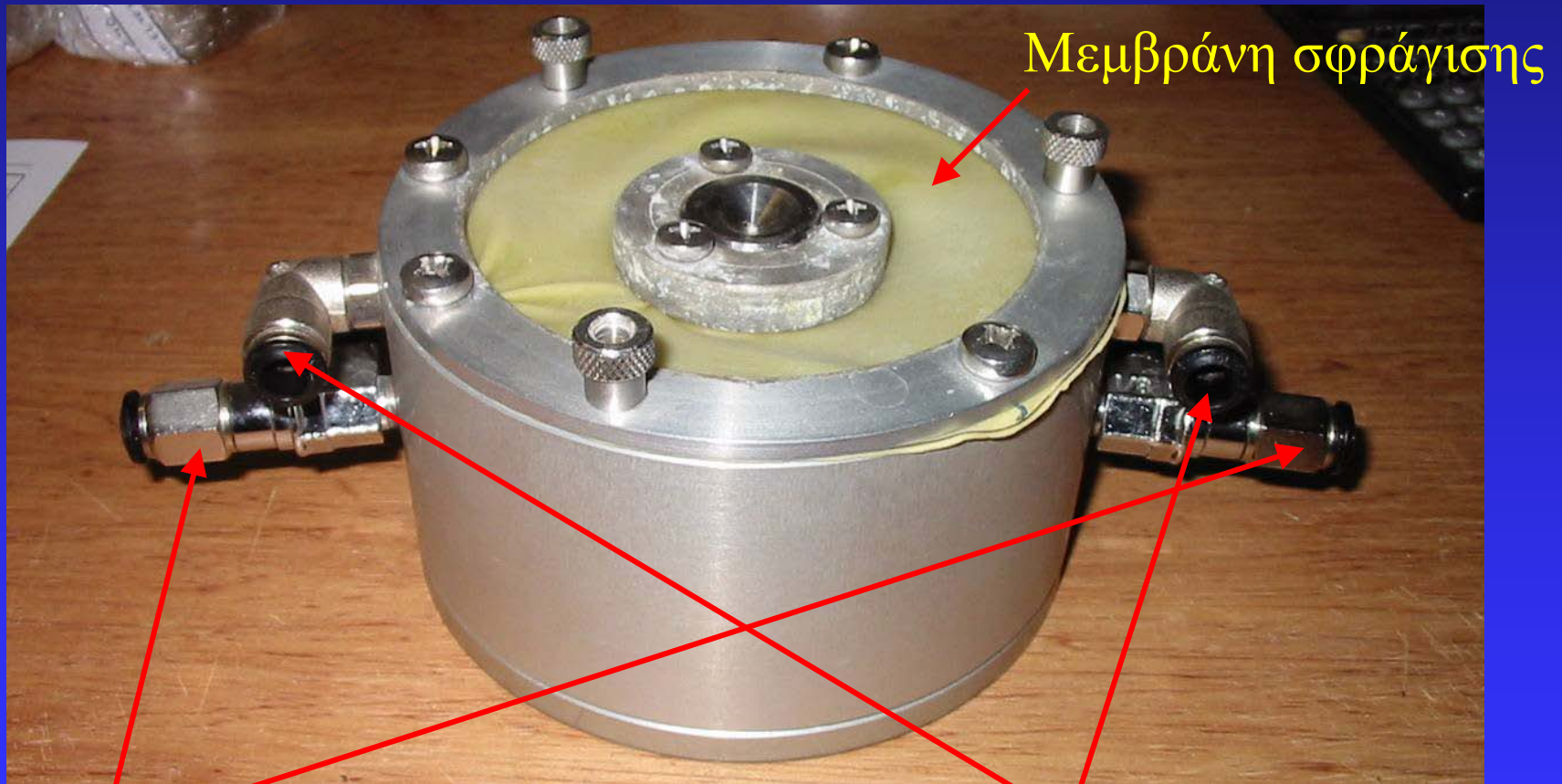
MB $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$: 148. Συγκέντρωση επίτευξης κορεσμού διαλύματος: 9M, δηλ. 1332g $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ σε 1l νερού. Έστω ότι θα διαφύγει το σύνολο του νερού του δοκιμίου, δηλ. 100ml ακόμα θα διαφύγουν στον διαλύτη. Τότε πρέπει εξ αρχής να προβλεφθούν 133.2g διαλυμένης ουσίας οπότε η αρχική συγκέντρωση να είναι 9.9M, αλλιώς η συγκέντρωση θα τείνει να γίνει από 9M 8.2M → Αποκορεσμός!

Ο έλεγχος της ολικής μύζησης (total suction) Εφαρμογή της μεθόδου σε συσκευές προσδιορισμού μηχανικών ιδιοτήτων – Παράδειγμα ενός συμπιεσμέτρου



Ο αέρας από έναν θάλαμο με διάλυμα μεταφέρεται μέσω μιας περισταλτικής αντλίας στο αεροστεγές περιβάλλον μιας κυψέλης συμπιεσμέτρου

Ο έλεγχος της ολικής μύζησης (total suction)
Εφαρμογή της μεθόδου σε συσκευές προσδιορισμού μηχανικών
ιδιοτήτων – Τροποποιημένη κυψέλη μονοδιάστατης συμπίεσης



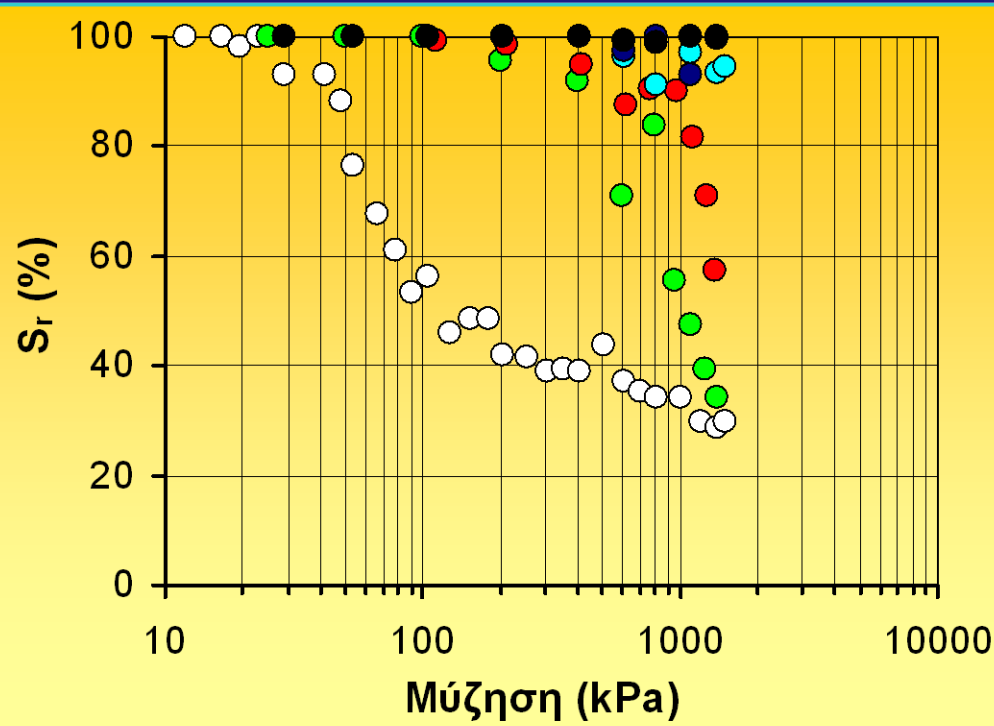
Μεμβράνη σφράγισης

Επικοινωνία με κάτω
πορόλιθο

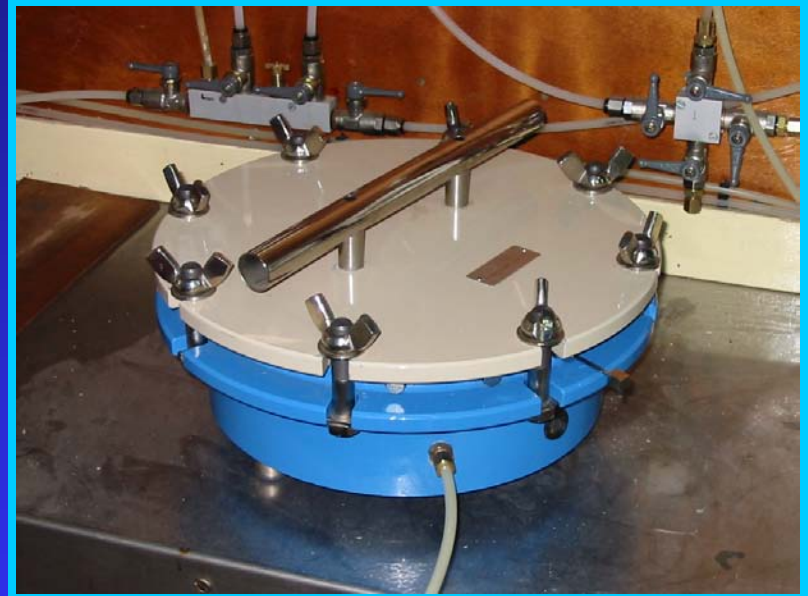
Επικοινωνία με άνω
πορόλιθο

Μ. Μπαρδάνης, 2011

Χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού για εδαφικά υλικά από τον ελλαδικό χώρο



Προσδιορισμός σε θάλαμο μύζησης



○ Ιλύς Λίμνης Ιωαννίνων

● Μάργα Κορίνθου

● Φυσική Μάργα Κορίνθου

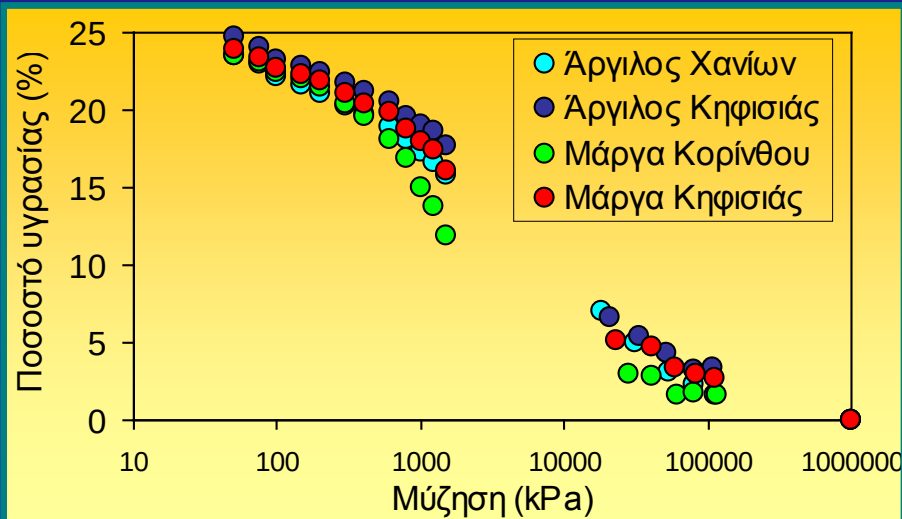
● Άργιλος Χανίων

● Άργιλος Κηφισιάς

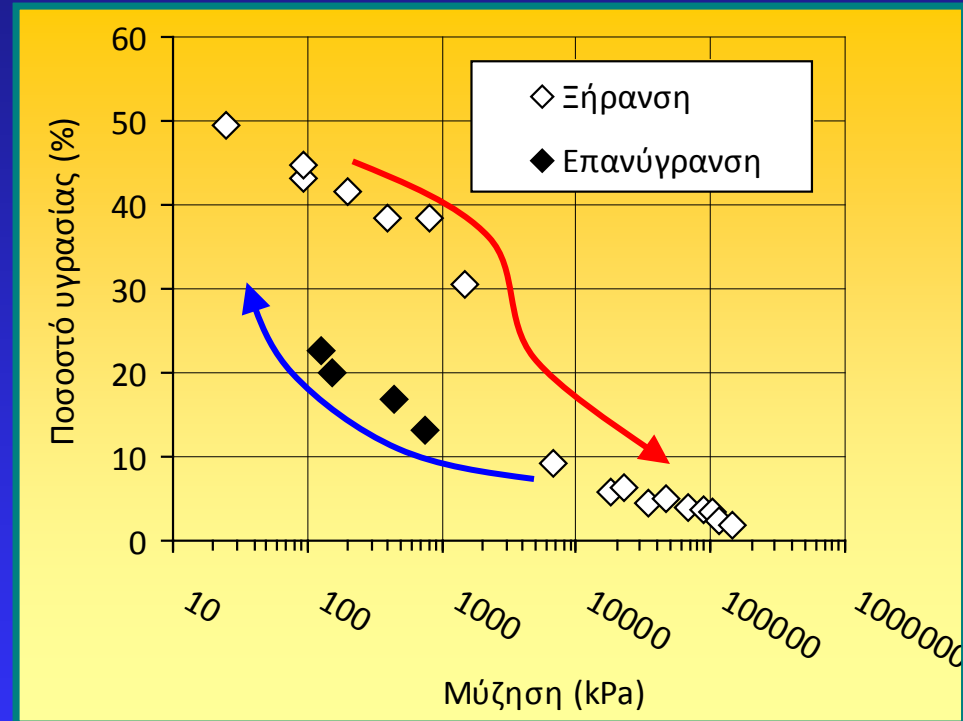
● Μάργα Κηφισιάς

Χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού για εδαφικά υλικά από τον ελλαδικό χώρο

Προσδιορισμός σε θάλαμο μύζησης και θαλάμους υδατικών διαλυμάτων



Τα εδαφικά υλικά της προηγούμενης διαφάνειας



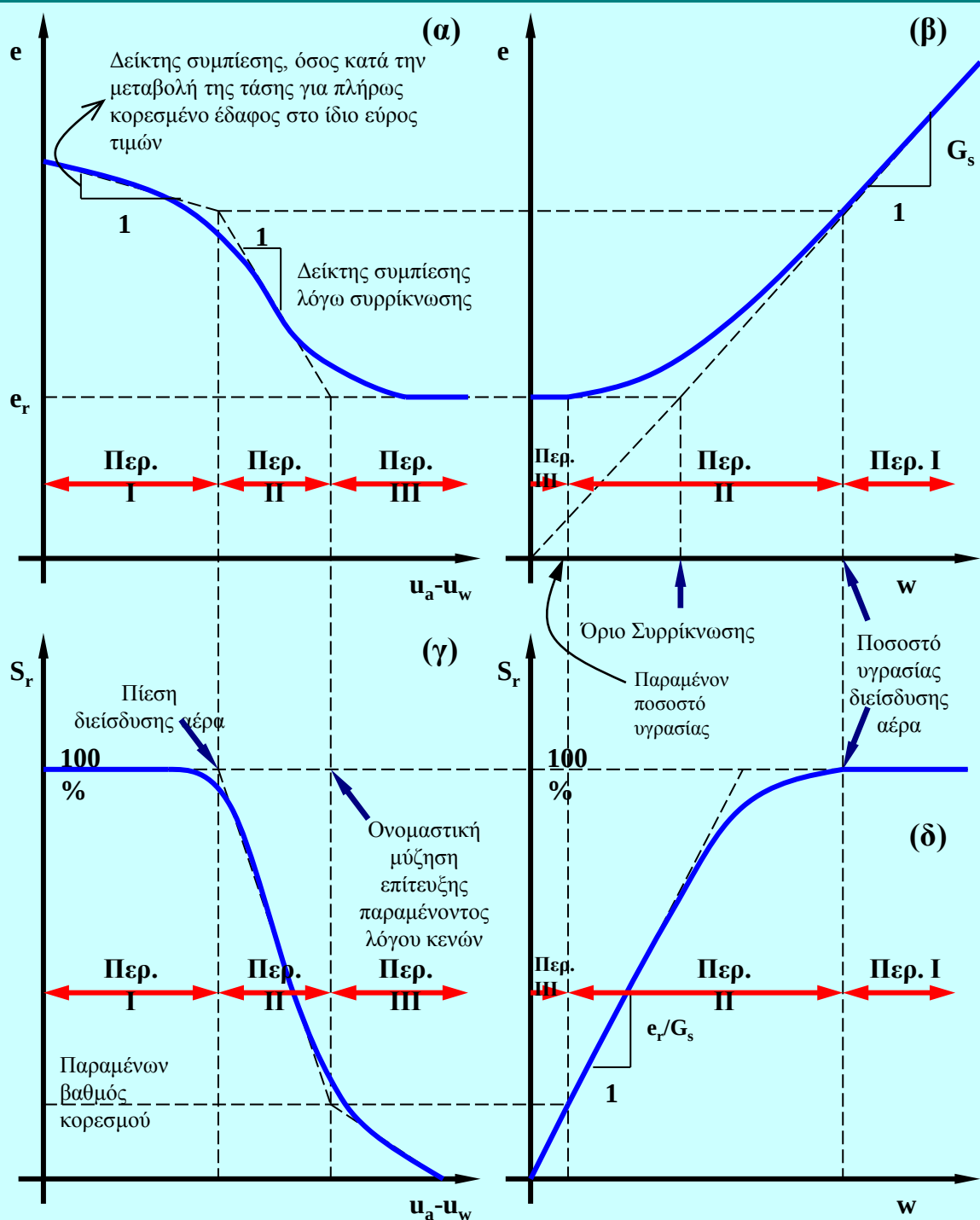
Αργιλώδης άμμος με χάλικες από το υλικό μεταξύ ογκολίθων στην περιοχή βραχολίσθησης Τεμπών της 17/12/09

Συμπιεστότητα μη κορεσμένων εδαφών

- Καμπύλες συρρίκνωσης και χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού
- Διόγκωση εδαφικών υλικών
- Συμπίεση υπό σταθερή μύζηση – Ο χώρος μύζησης-τάσης-λόγου κενών
- Κατάρρευση (collapse) κατά την διαβροχή υπό μεγάλες τάσεις

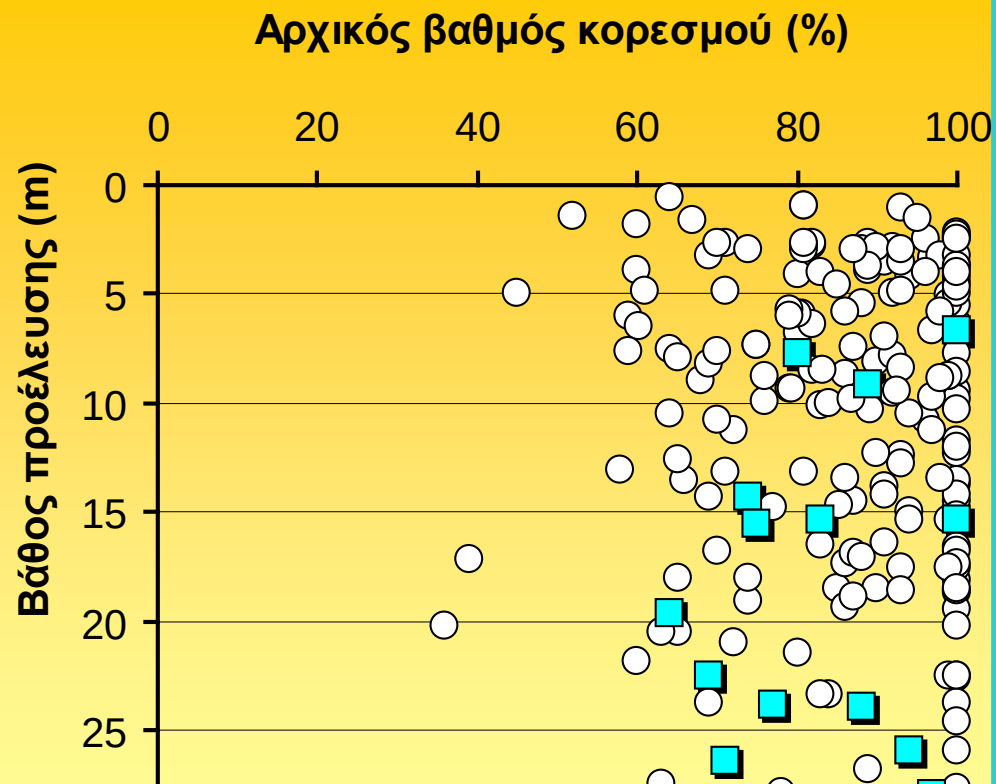
Συμπίεστικότητα μη κορεσμένων εδαφών

Καμπύλες συρρίκνωσης
και χαρακτηριστική
καμπύλη εδάφους-νερού

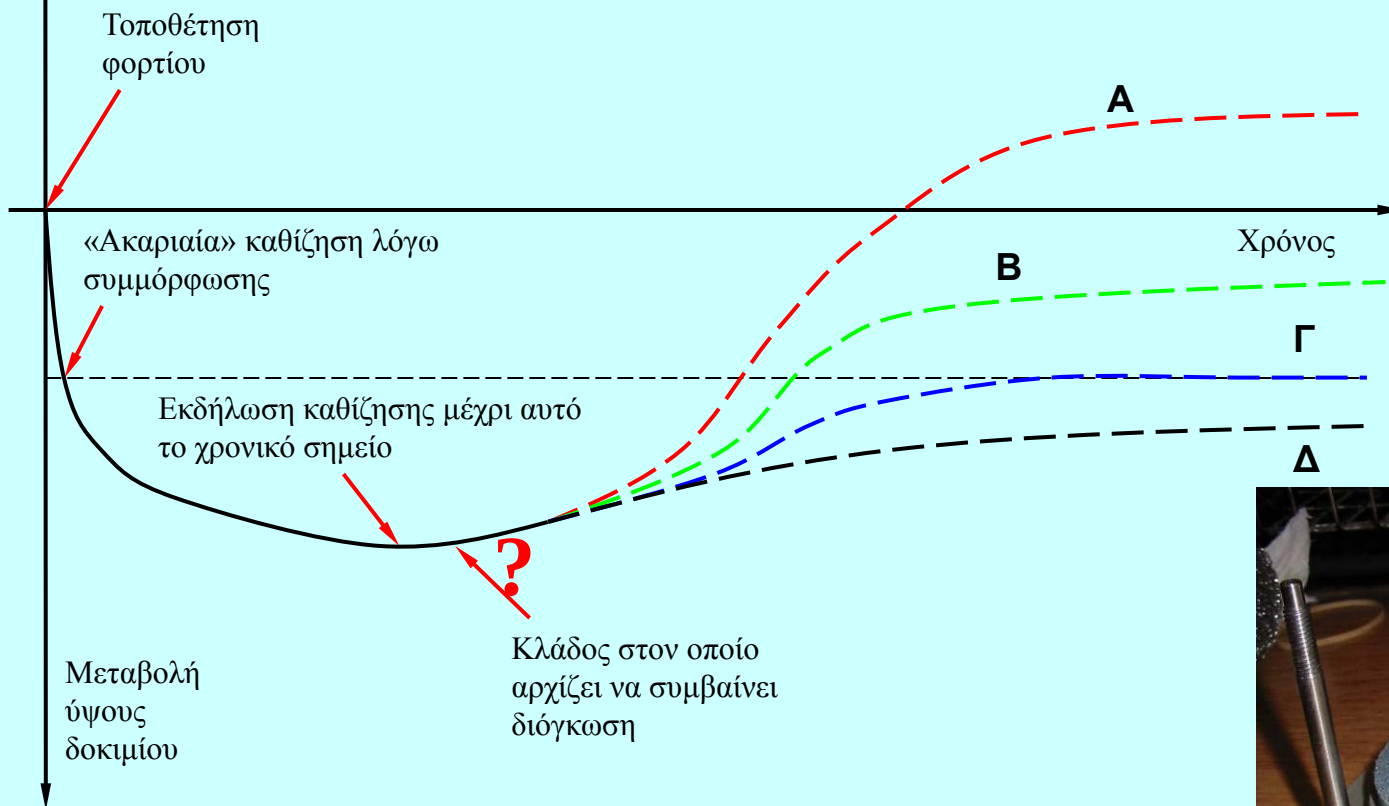


Συμπιεστότητα μη κορεσμένων εδαφών

Διόγκωση εδαφικών
υλικών



Πότε παίρνω την απόφαση να αυξήσω το φορτίο;



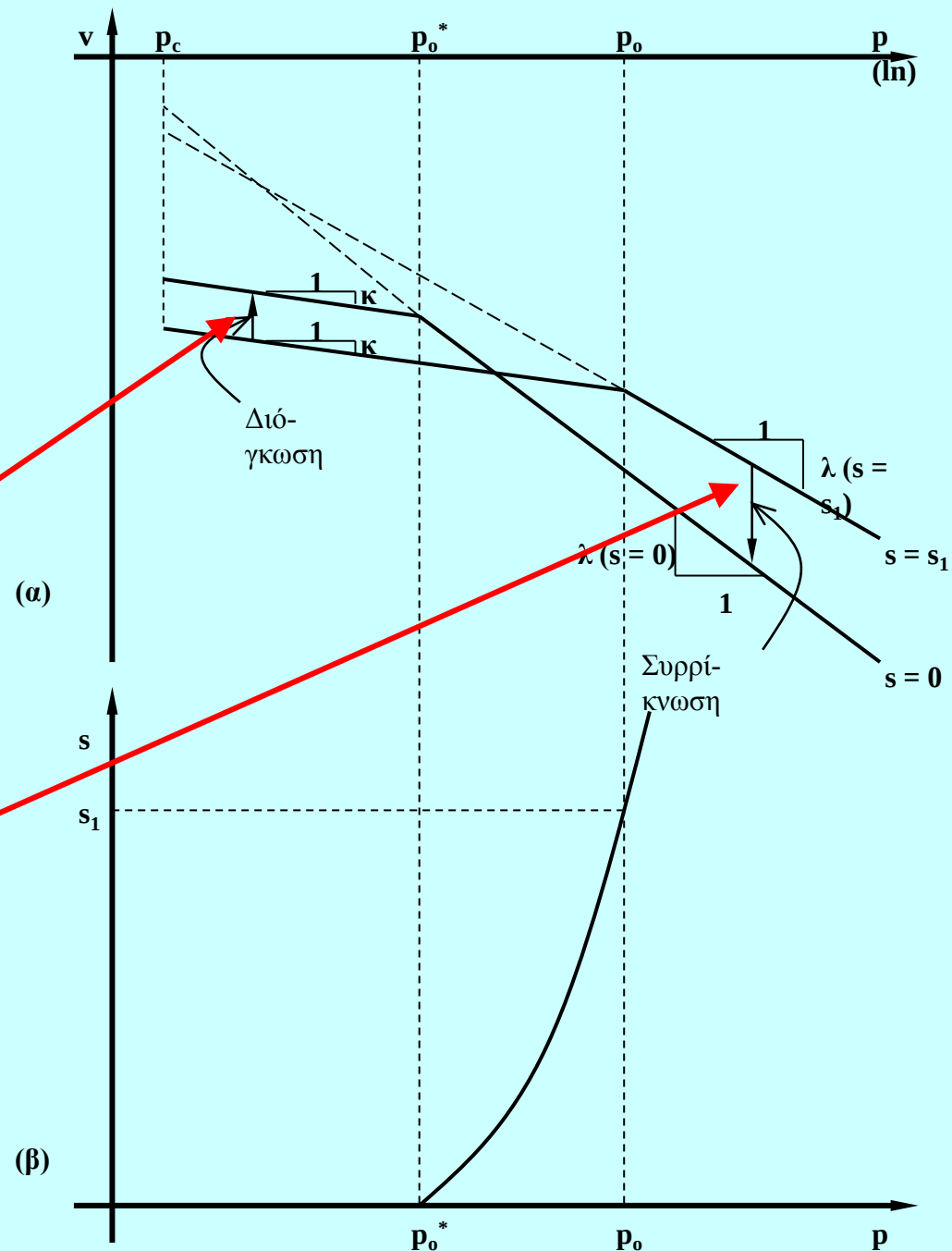
Για να μετρηθεί αξιόπιστα η πίεση διόγκωσης πρέπει πρώτα να γίνει σε κάθε συμπιεσόμετρο για δεδομένο συνδυασμό κυψέλης-πορολίθων- συμπιεσομέτρου ΔΟΚΙΜΗ ΣΥΜΜΟΡΦΩΣΗΣ

Συμπιεστότητα μη κορεσμένων εδαφών

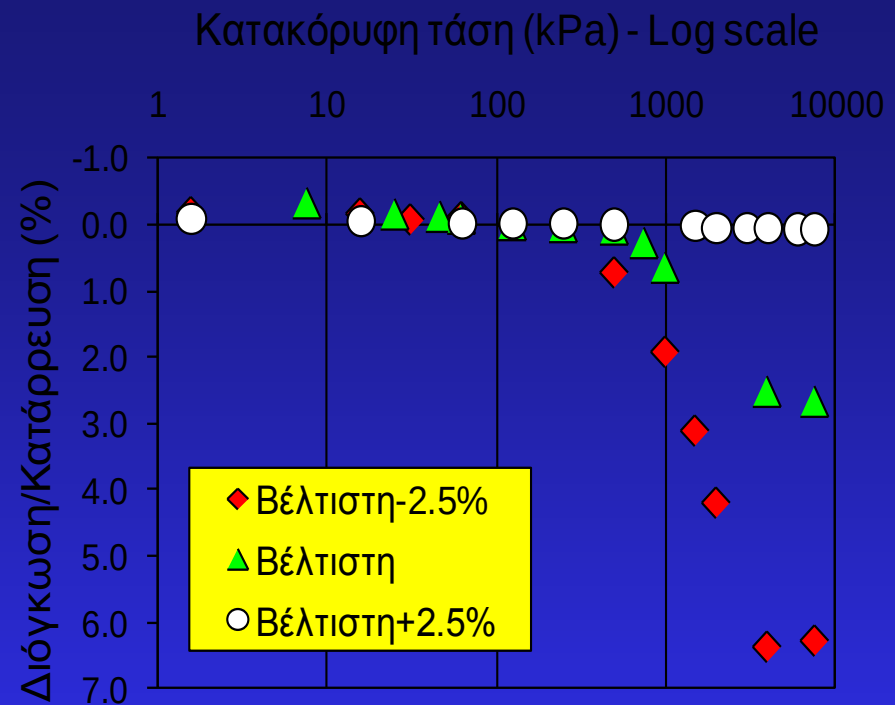
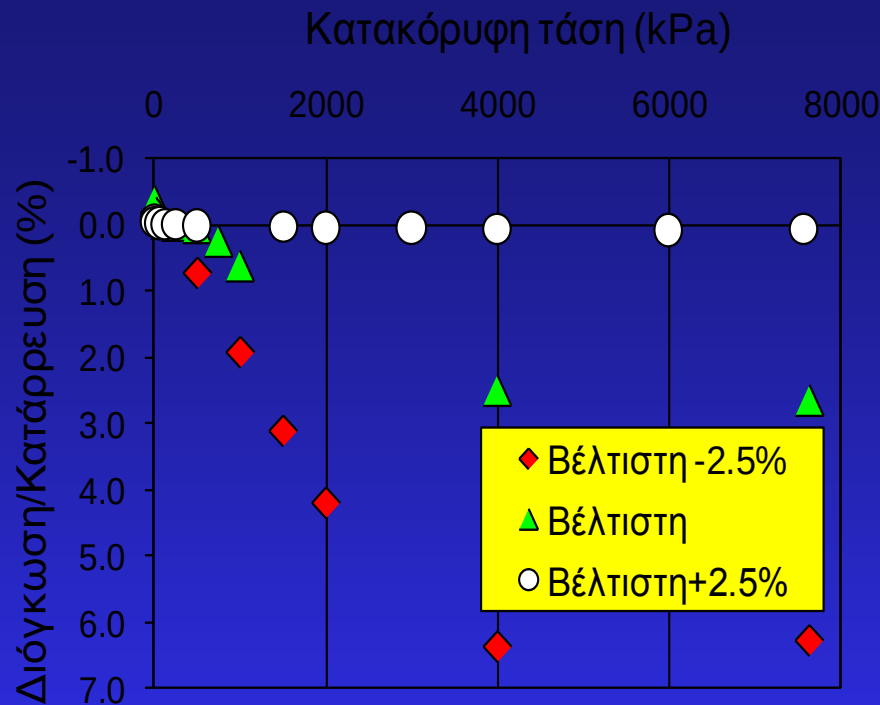
Συμπίεση υπό σταθερή
μύζηση – Ο χώρος τάσης-
μύζησης-λόγου κενών

Ενώ λοιπόν διαβροχή υπό
χαμηλή τάση θα επιφέρει
διόγκωση,

διαβροχή υπό υψηλή τάση θα
επιφέρει κατάρρευση
(collapse)



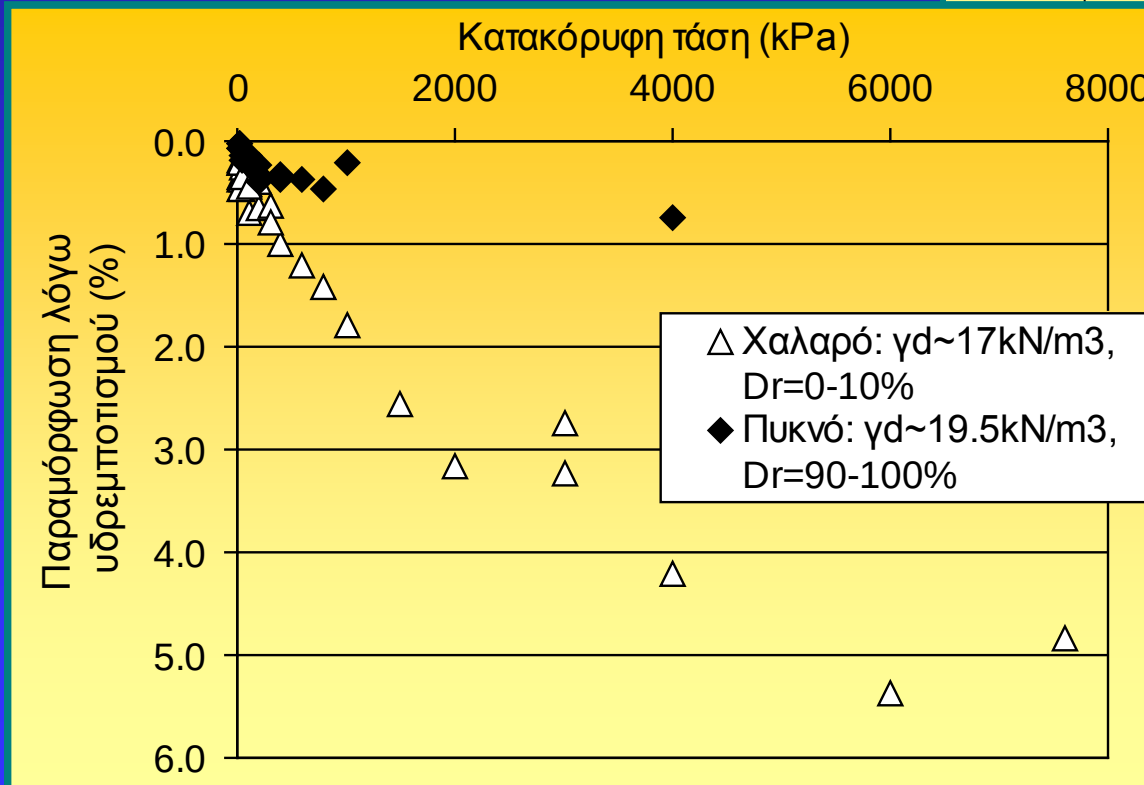
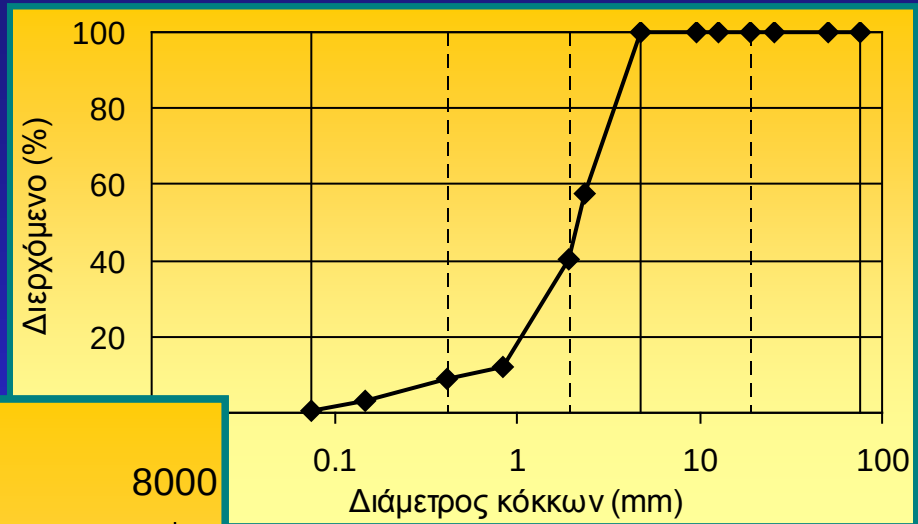
Παραμορφώσεις λόγω διόγκωσης/κατάρρευσης



- Η μέγιστη παραμόρφωση λόγω κατάρρευσης ήταν 6.4% για δοκίμια συμπυκνωμένα ξηρά από την βέλτιστη, 2.7% στην βέλτιστη και πρακτικά αμελητέα υγρά από την βέλτιστη (μόλις 0.07%)
- Η εμφάνιση μεγάλων παραμορφώσεων λόγω κατάρρευσης άρχισε σε κατακόρυφη τάση 250 kPa για δοκίμια συμπυκνωμένα ξηρά από την βέλτιστη και 500 kPa για δοκίμια συμπυκνωμένα στην βέλτιστη.
- Και για τις δύο υγρασίες η παραμόρφωση σταθεροποιήθηκε σε τάση 4 MPa

Παρόμοια αποτελέσματα για θραυστή χονδρόκοκκη άμμο («ρυζάκι»)

$w = 0.5\%$



Κατάρρευση κατά την διαβροχή πολύ χονδρόκοκκων υλικών
Συσκευή άμεσης διάτμησης πολύ μεγάλων διαστάσεων με
κυκλική διατομή



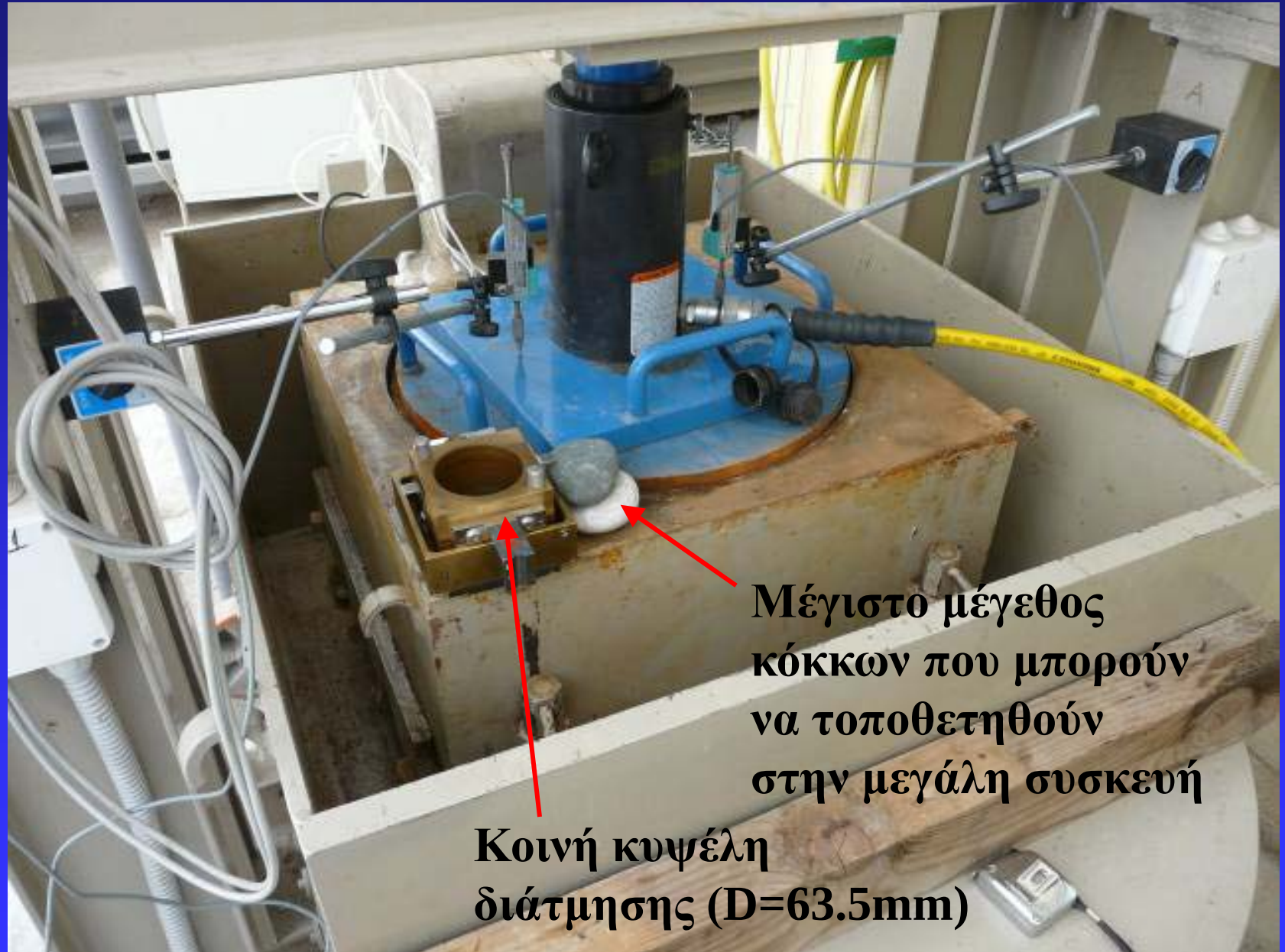
$D=45\text{cm},$

$H=30\text{cm},$

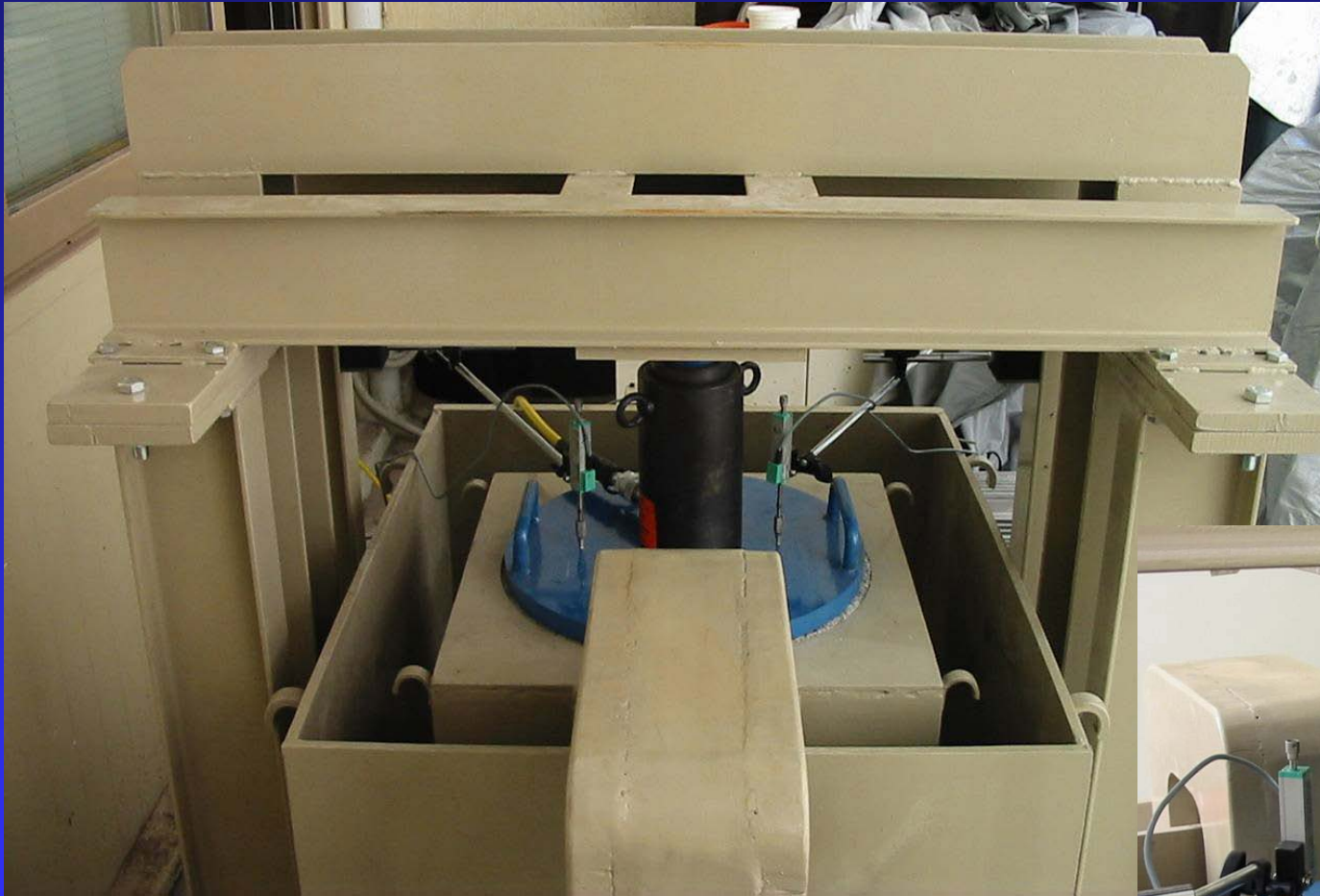
$\max \sigma_v =$
 $1500\text{kPa},$

Δυνατότητα
πλήρους
υδρεμπο-
τισμού του
δοκιμίου

Κατάρρευση κατά την διαβροχή πολύ χονδρόκοκκων υλικών



Κατάρρευση κατά την διαβροχή πολύ χονδρόκοκκων υλικών



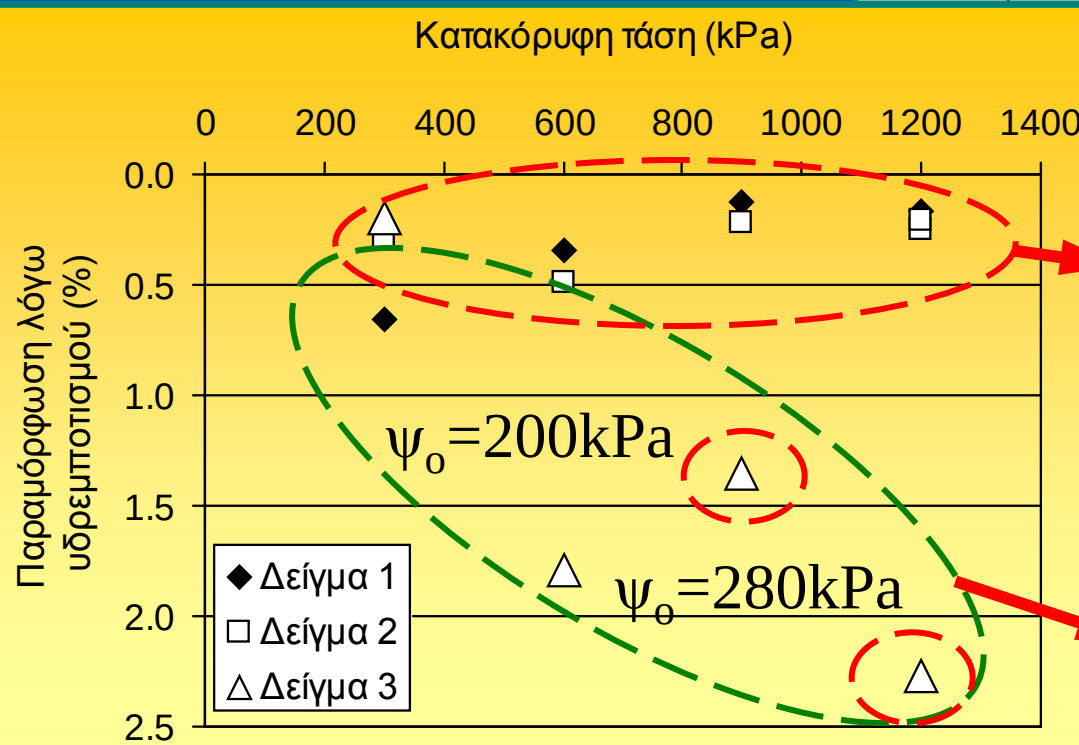
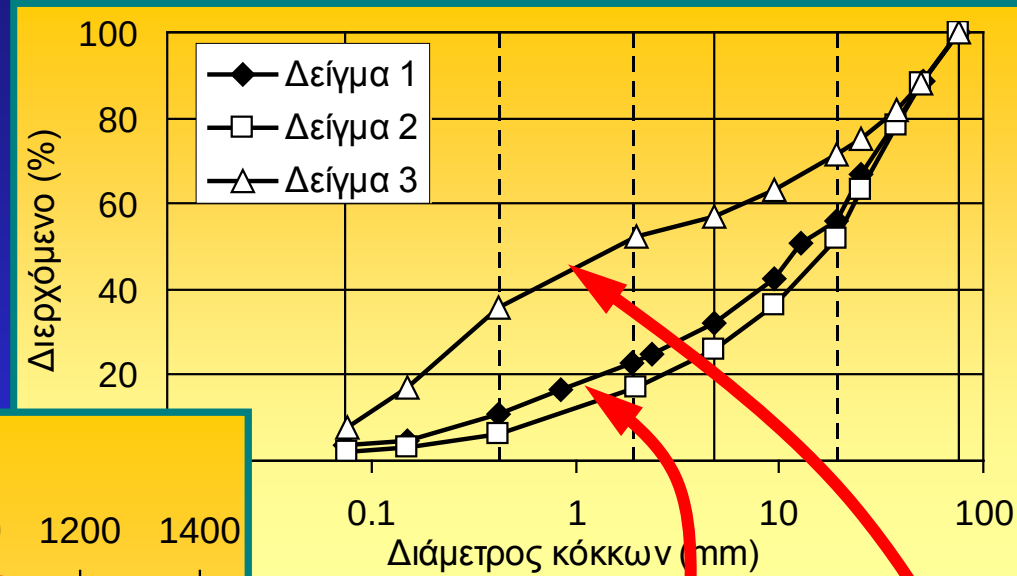
Κατάρρευση κατά την διαβροχή πολύ χονδρόκοκκων υλικών



Κατάρρευση κατά την διαβροχή πολύ χονδρόκοκκων υλικών

3 διαφορετικές κοκκομετρικές διαβαθμίσεις
– 2 διαφορετικές πυκνότητες

Το αμμοχάλικο αυτό
ήταν ποτάμιο



Καλής διαβάθμισης
αμμοχάλικο με $w=2\%$ και
 $\gamma_d=24 \text{ kN/m}^3$

$w=2\%$ και $\gamma_d=21.5 \text{ kN/m}^3$

M. Μπαρδάνης, 2011

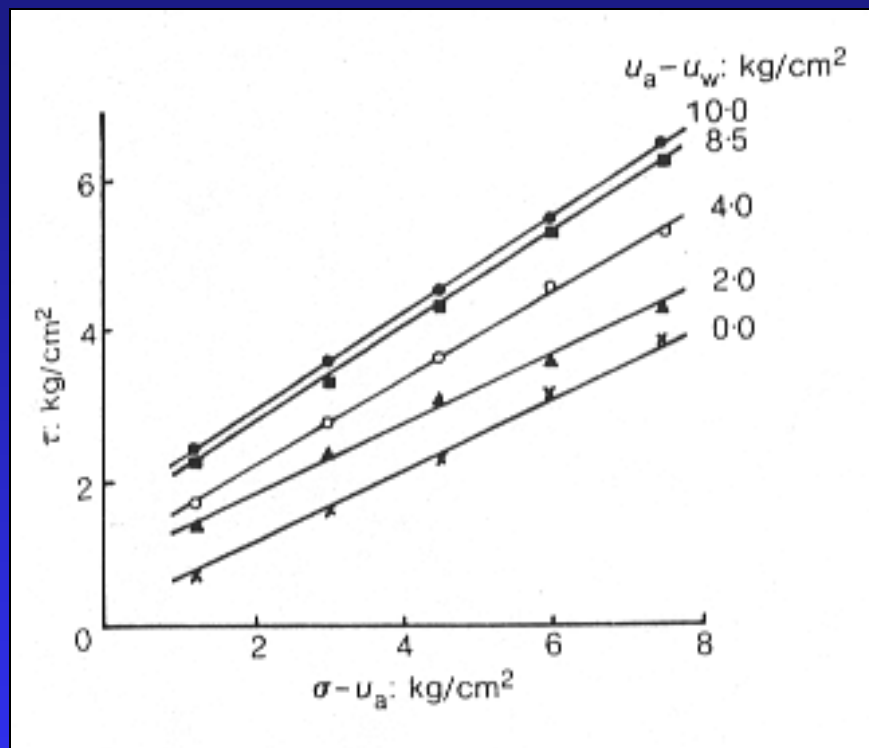
Διατμητική Αντοχή

Ο Terzaghi το 1925 στο “Erdbaumechanik” έγραφε ότι αν στα όρια ενός εδαφικού υλικού ή μέσα στη μάζα του εφαρμόζεται μία αρνητική πίεση πόρων, τότε το έδαφος αυτό έχει μία **φαινόμενη συνοχή** (scheinbare Kohäsion) ίση με:

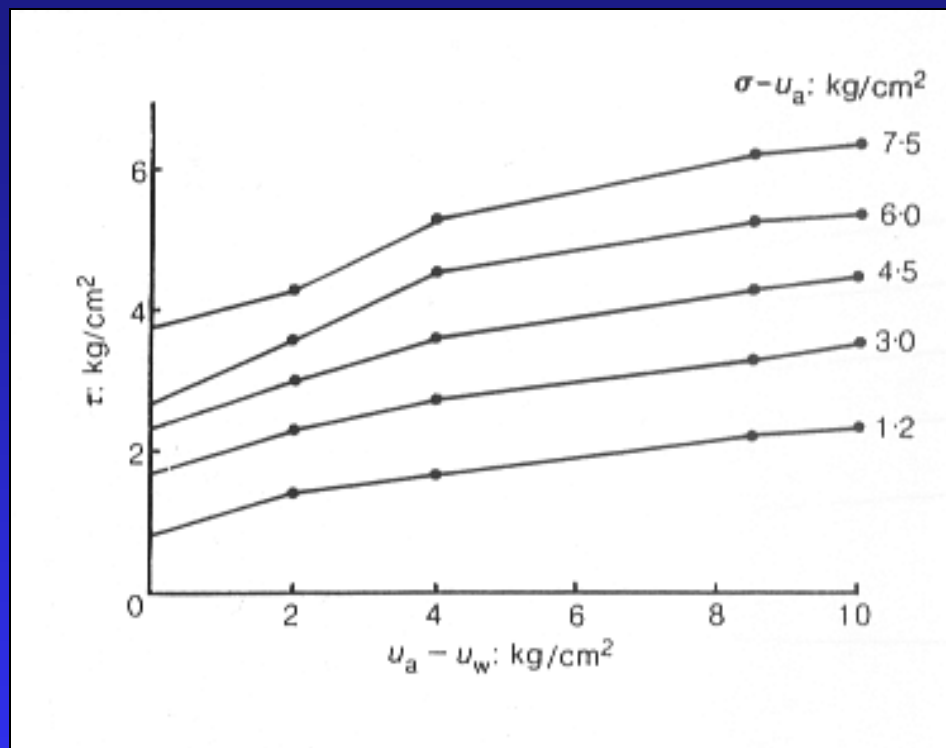
$$q_t = f_1 \cdot p_k$$

όπου q_t η φαινόμενη συνοχή, p_k η εφαρμοζόμενη πίεση και f_1 παράμετρος χαρακτηριστική κάθε υλικού.

Διατμητική Αντοχή



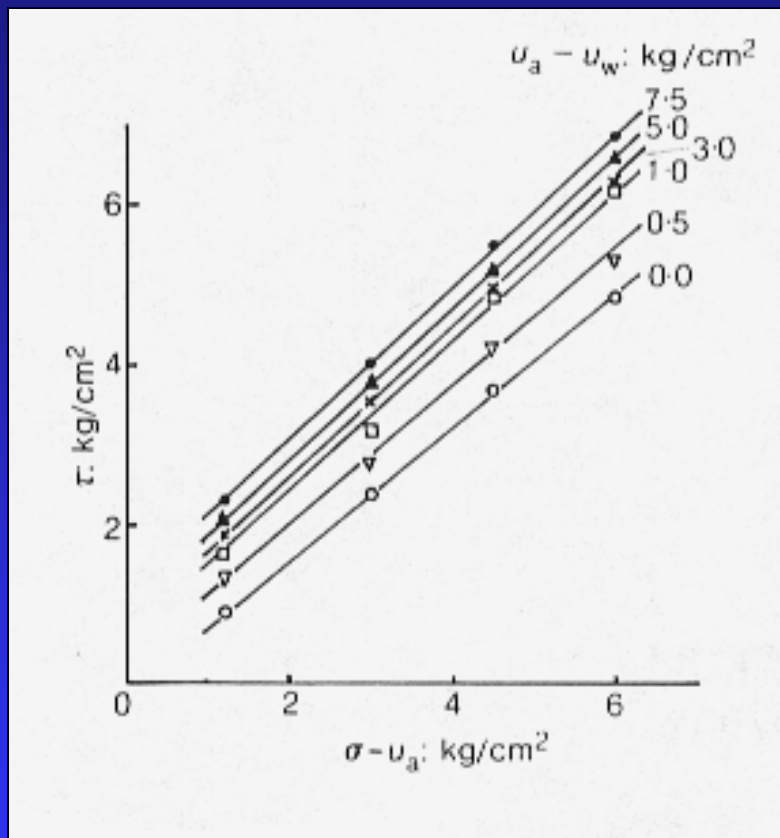
$$\tau - (\sigma - u_a)$$



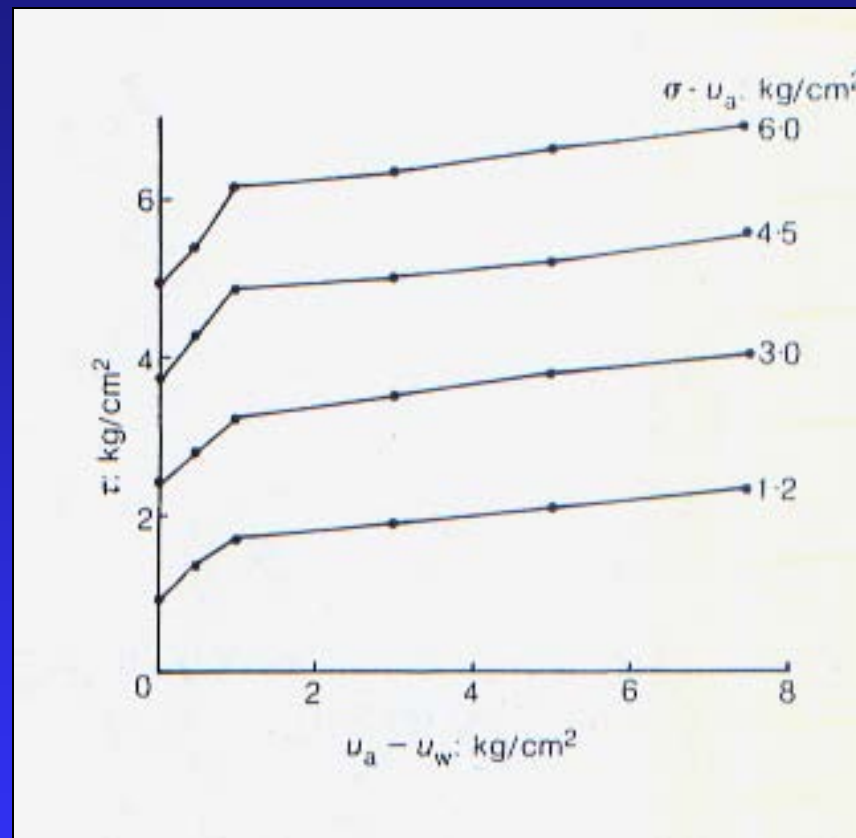
$$\tau - (u_a - u_w)$$

Δοκιμές απευθείας διάτμησης υπό ελεγχόμενη αναρρόφηση σε αναζυμωμένη γκρίζα άργιλο Μαδρίτης (Escario & Saez, 1986).

Διατμητική Αντοχή

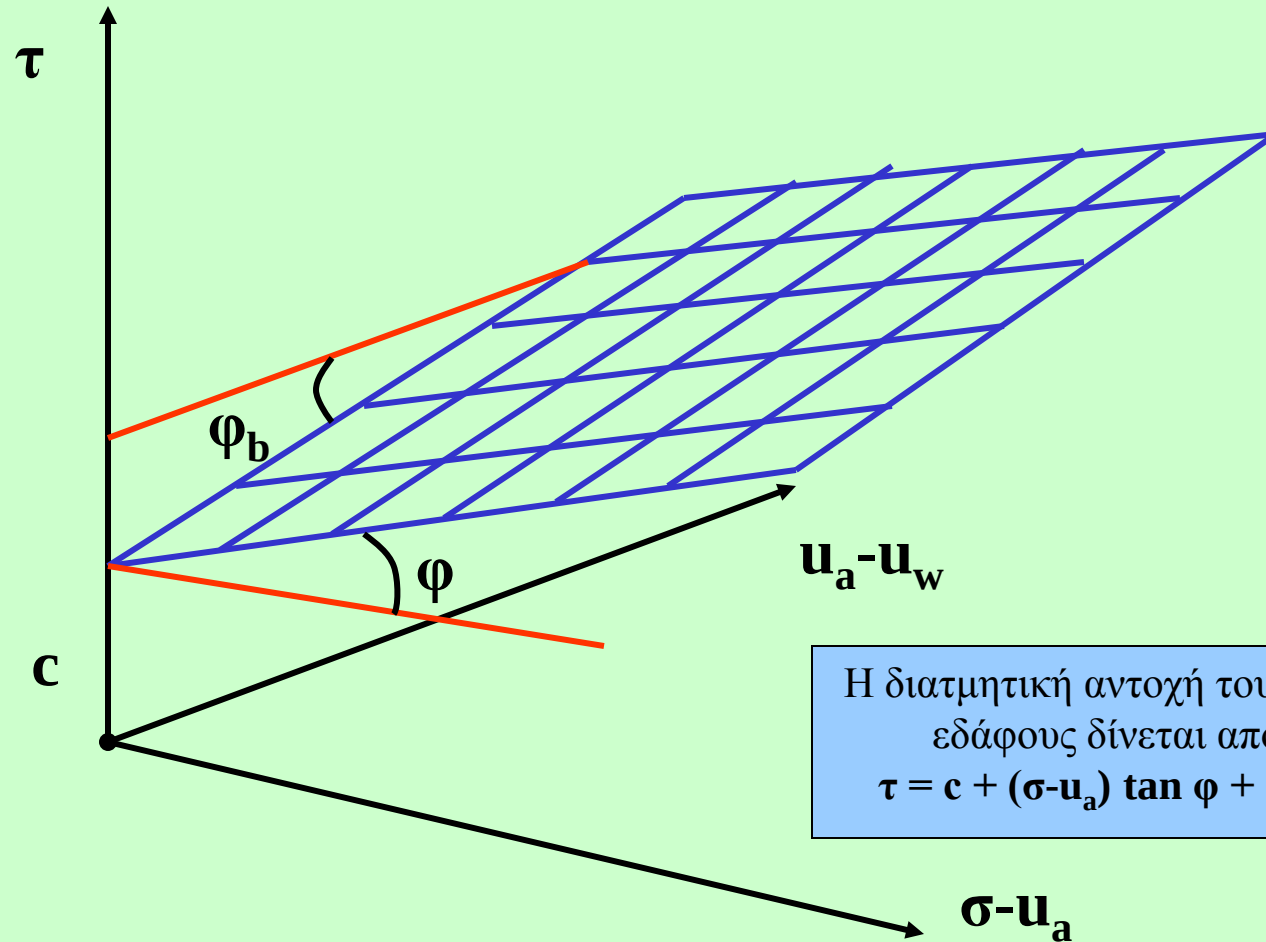


$$\tau - (\sigma - u_a)$$



$$\tau - (u_a - u_w)$$

Δοκιμές απευθείας διάτμησης υπό ελεγχόμενη αναρρόφηση σε αναζυμωμένη αργιλώδη άμμο Μαδρίτης (Escario & Saez, 1986).

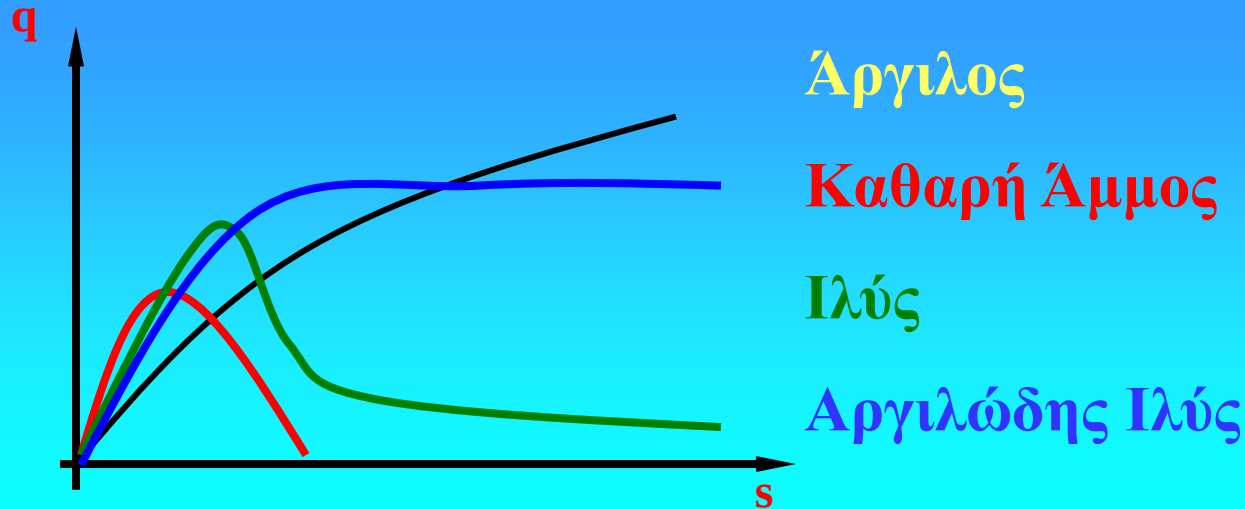


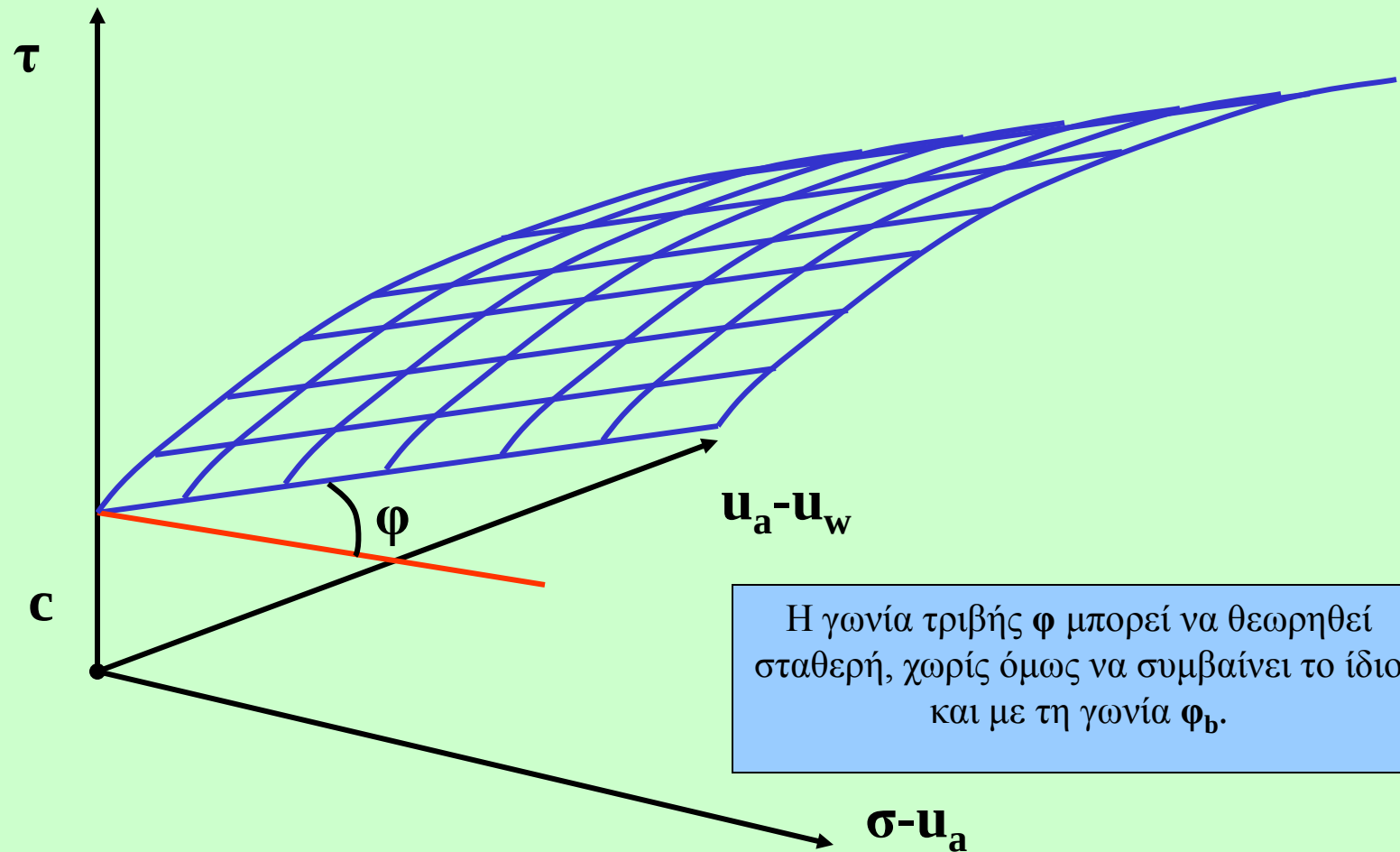
Η διατμητική αντοχή του μη κορεσμένου
 εδάφους δίνεται από τη σχέση:

$$\tau = c + (\sigma - u_a) \tan \varphi + (u_a - u_w) \tan \varphi_b$$

Γενικευμένο κριτήριο Mohr-Coulomb για μη
 κορεσμένα εδάφη (γραμμικό) [Fredlund et al, 1978].

Εξέλιξη διατμητικής αντοχή κοκκωδών εδαφών με τον βαθμό κορεσμού





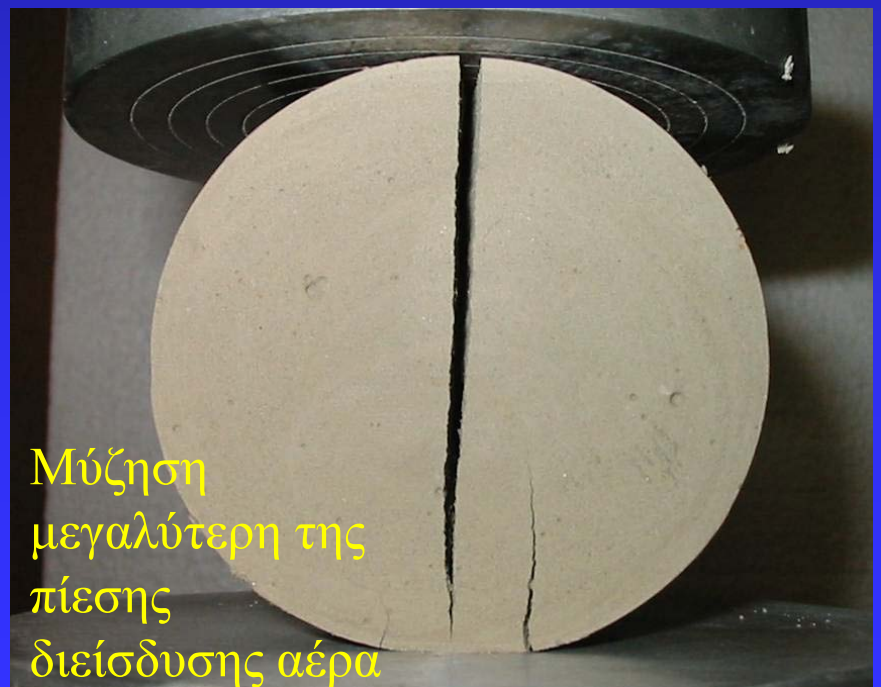
Γενικευμένο κριτήριο Mohr-Coulomb για μη κορεσμένα εδάφη (μη γραμμικό).

Διατμητική αντοχή αναζυμωμένων εδαφών μετά από ξήρανση

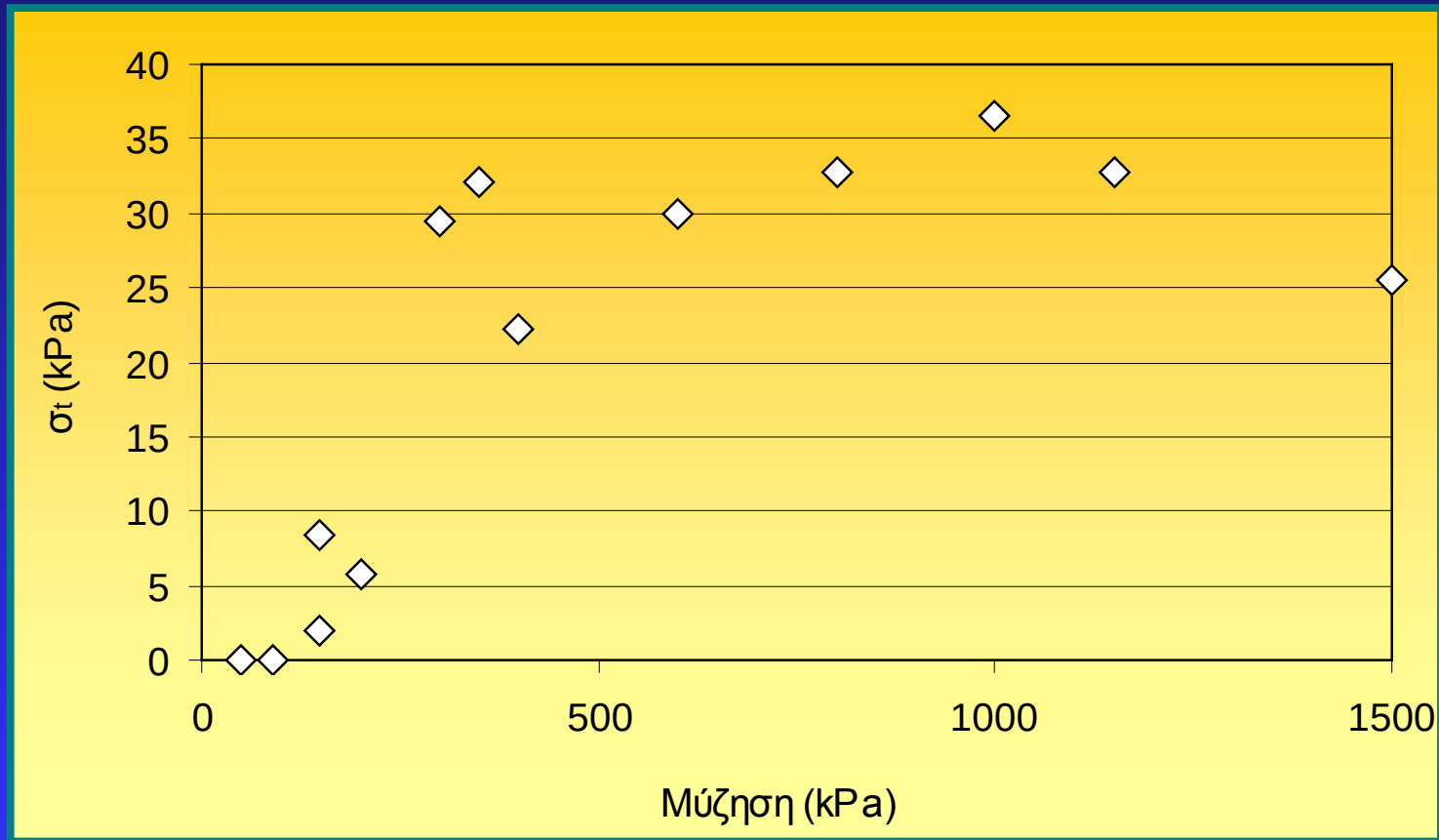


Με την κατάλληλη διάταξη και για αναζυμωμένα εδάφη

Διατμητική αντοχή αναζυμωμένων εδαφών μετά από ξήρανση



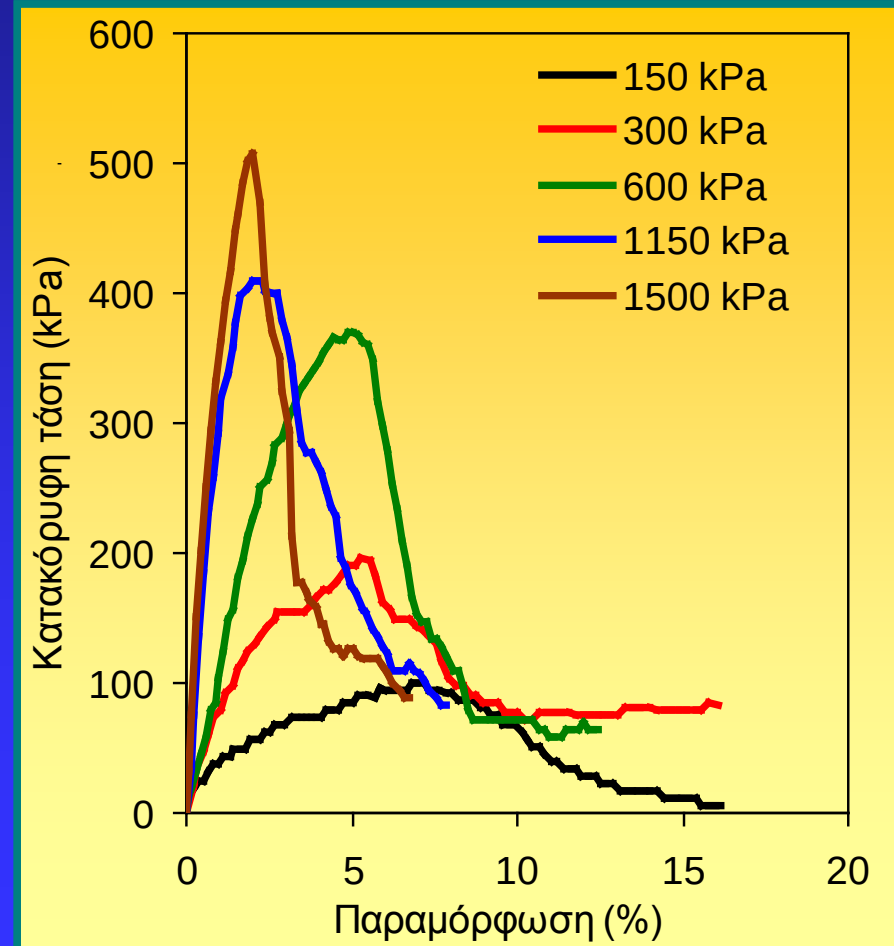
Διατμητική αντοχή αναζυμωμένων εδαφών μετά από ξήρανση



Στα αποτελέσματα από τις δοκιμές θλίψης κατά γενέτειρα διαφαίνεται αύξηση της διατμητικής αντοχής μετά την πίεση διείδυσης αέρα και μείωση μετά τα 1000 kPa

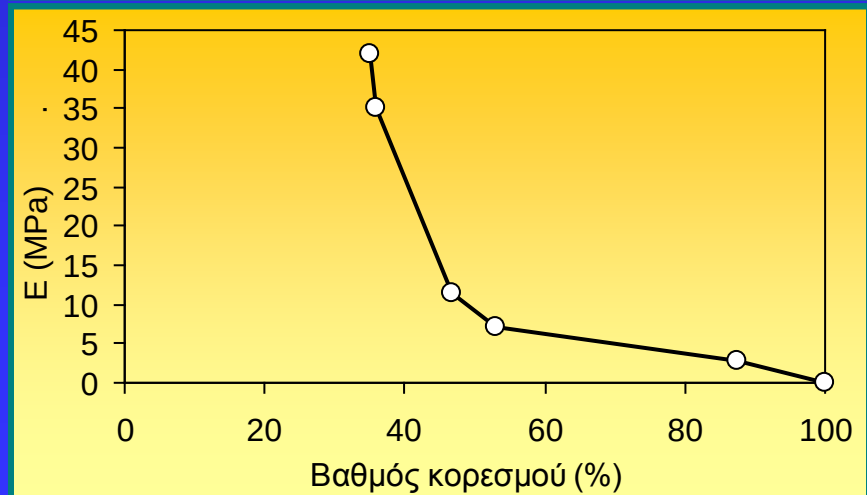
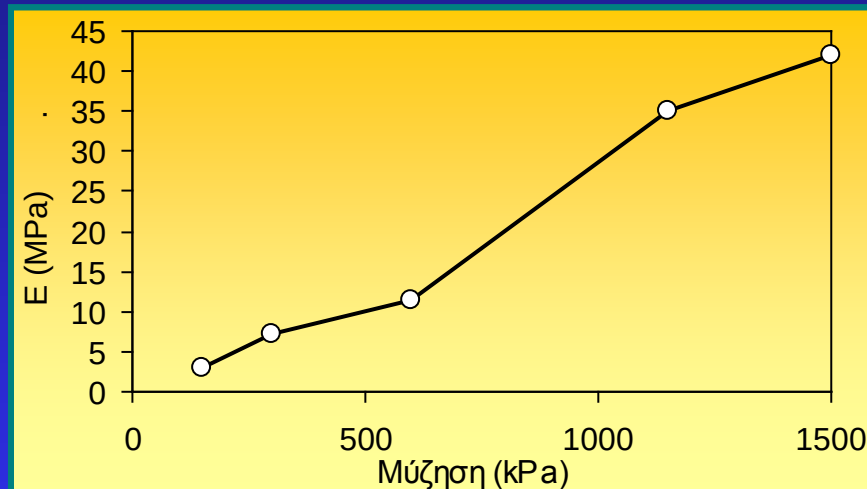
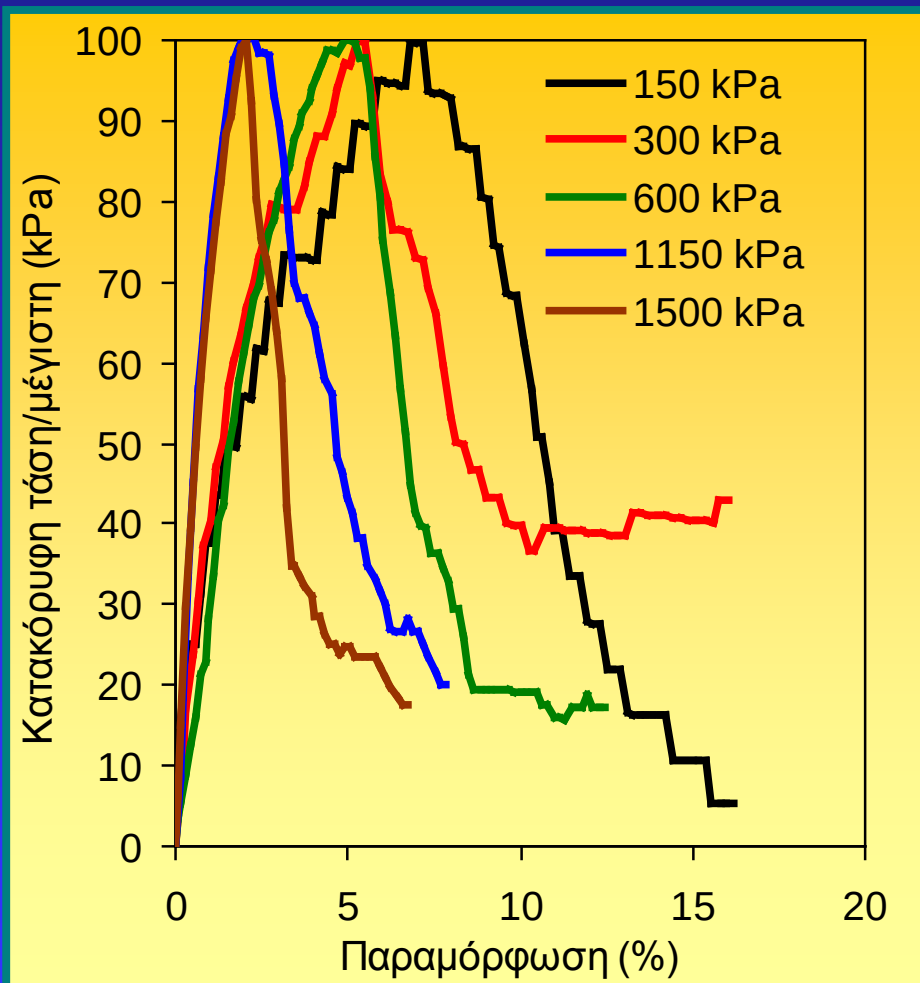
Διατμητική αντοχή μη κορεσμένων εδαφών

Δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης σε δοκίμια αναζυμωμένης μάργας Κορίνθου αμέσως μετά την ξήρανσή τους σε θάλαμο μύζησης



Διατμητική αντοχή μη κορεσμένων εδαφών

Δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης σε δοκίμια αναζυμωμένης μάργας Κορίνθου αμέσως μετά την ξήρανσή τους σε θάλαμο μύζησης



Μέτρηση μύζησης και υγρασίας σε δοκίμια μεγάλων διαστάσεων

Ένα υγρασιόμετρο,
ένα τενσιόμετρο και
δύο τεμάχια γύψου



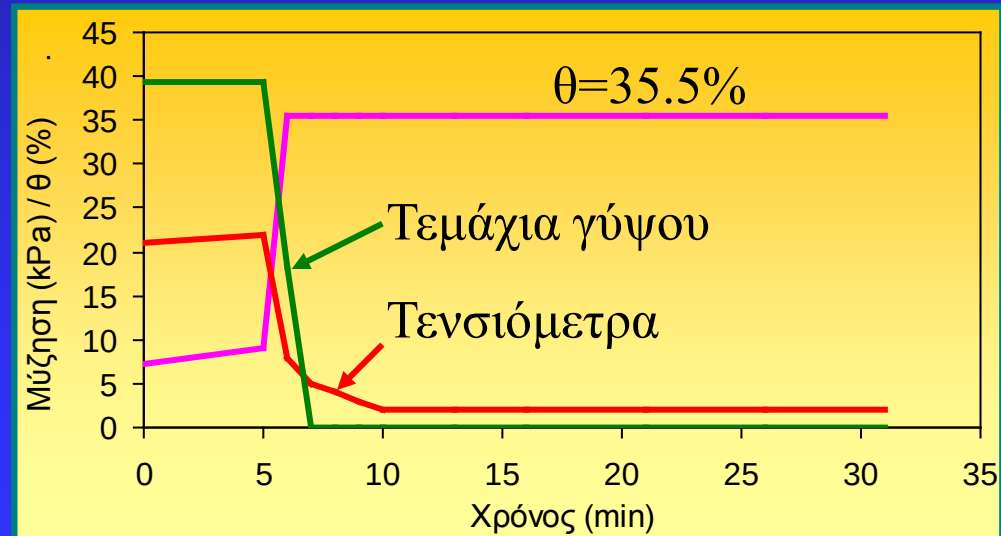
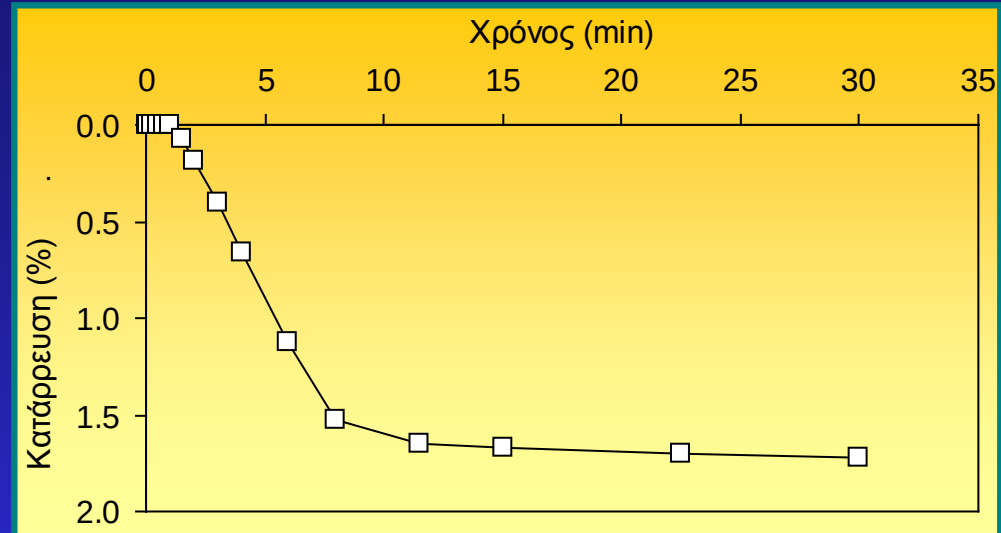
Μέτρηση μύζησης και υγρασίας σε δοκίμια μεγάλων διαστάσεων



Μέτρηση μύζησης και υγρασίας σε δοκίμια μεγάλων διαστάσεων

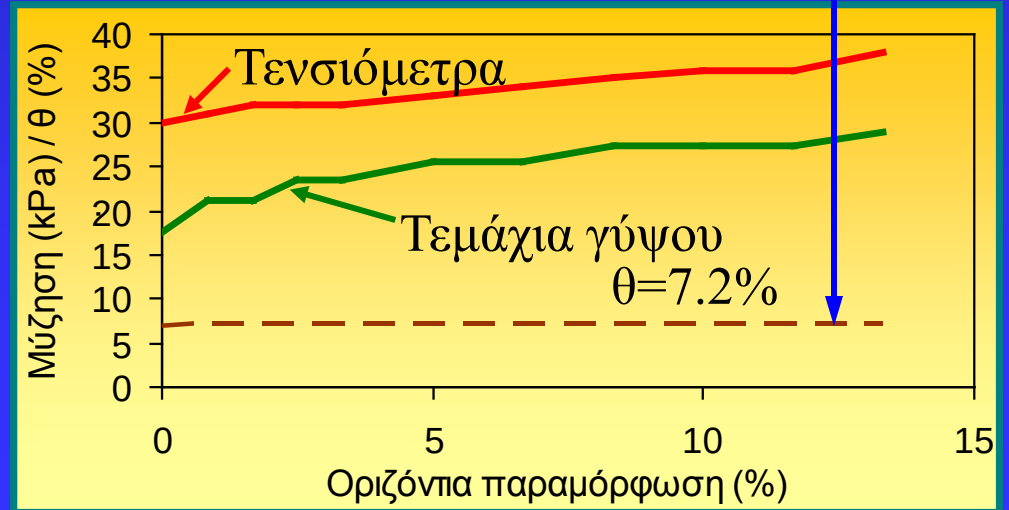
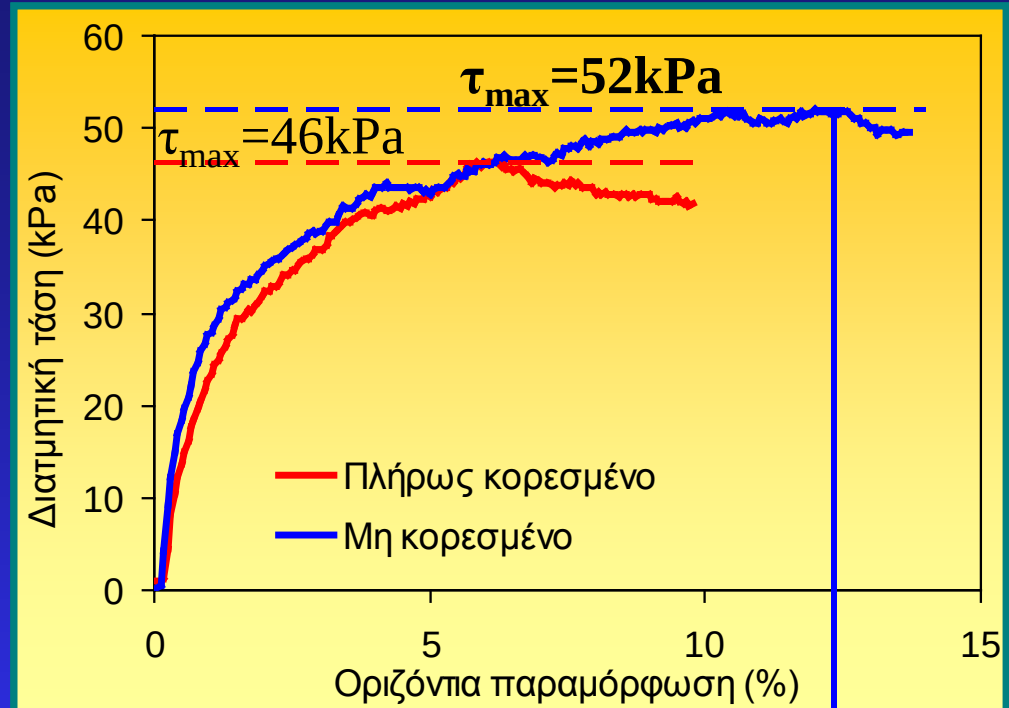
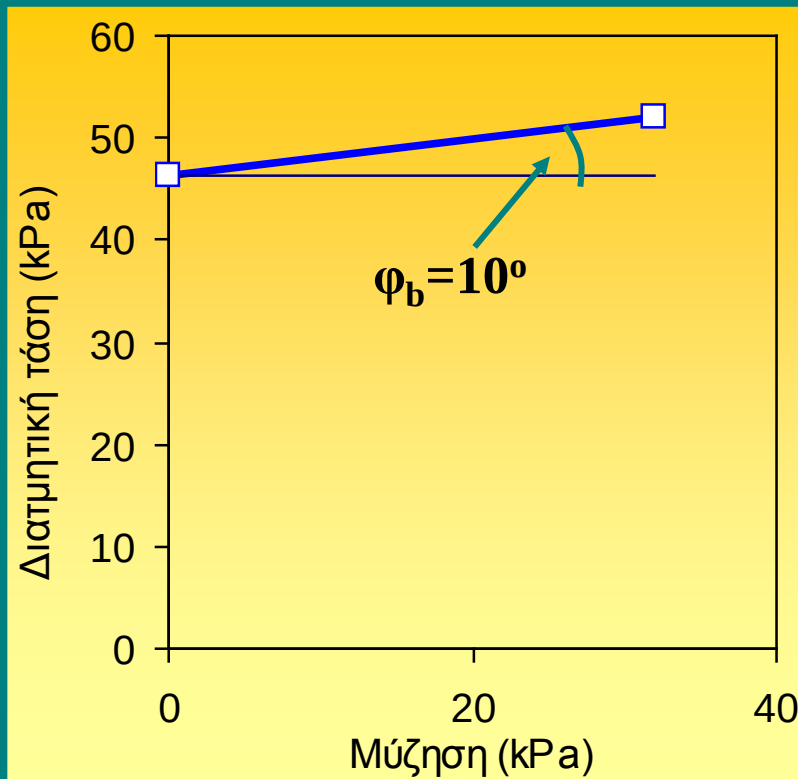
Στο δοκίμιο που κορέστηκε παρουσιάστηκε κατάρρευση (collapse) 1.8%, το θ αυξήθηκε από 7% σε 35.5% και η μύζηση μειώθηκε από 22kPa σε 2kPa με βάση τις ενδείξεις του τενσιομέτρου και από 39kPa σε 0 με βάση τις ενδείξεις των τεμαχίων γύψου.

ΌΛΑ τα όργανα αποκρίθηκαν πολύ γρήγορα στο συγκεκριμένο υλικό με τον χρόνο απόκρισής τους σε πλήρη ταύτιση με τον χρόνο εξέλιξης των καθιζήσεων



Μέτρηση μύζησης και υγρασίας σε δοκίμια μεγάλων διαστάσεων

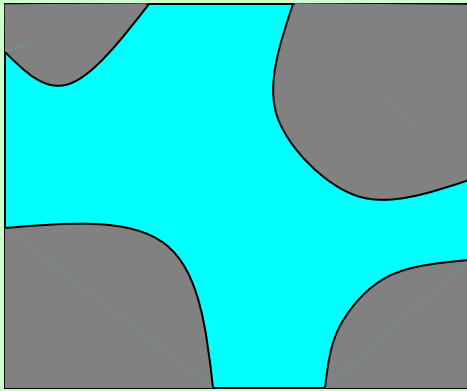
Το κορεσμένο δοκίμιο επέδειξε μικρότερη αντοχή υπό την ίδια $\sigma_v=50\text{kPa}$, ενώ το μη κορεσμένο τη στιγμή της αστοχίας είχε μύζηση 32kPa



Διαπερατότητα μη κορεσμένων εδαφών

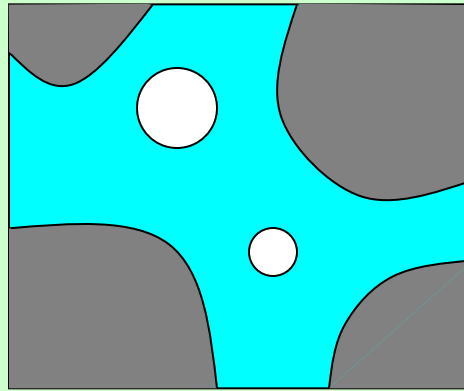
- Ο συντελεστής διαπερατότητας μη κορεσμένων εδαφών
- Η εξίσωση Laplace για πλήρως και για μη κορεσμένα εδάφη
- Αναλύσεις μη μόνιμης υπόγειας ροής

Ροή σε πορώδες μέσο



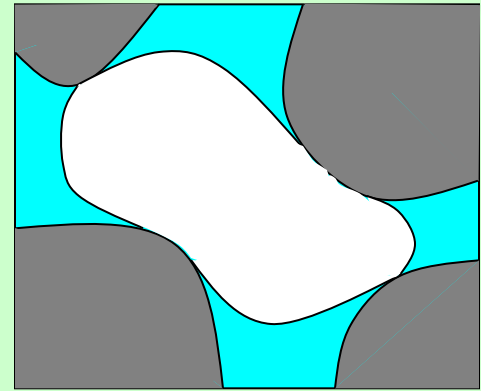
**Πλήρως
κορεσμένο
έδαφος.**

Μέγιστη επιφάνεια επί
της διατομής για τη
διέλευση του νερού.



**Μη κορεσμένο
έδαφος.**

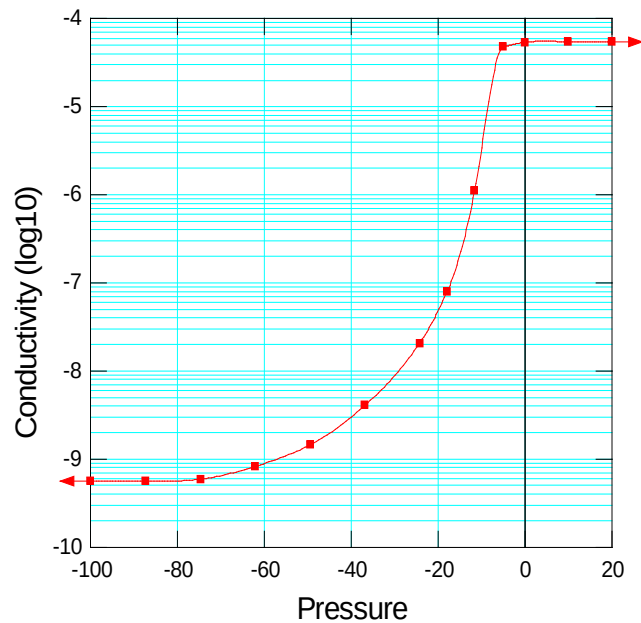
Διακριτές φυσαλίδες.
Μέρος της επιφάνειας
καταλαμβάνει ο αέρας.



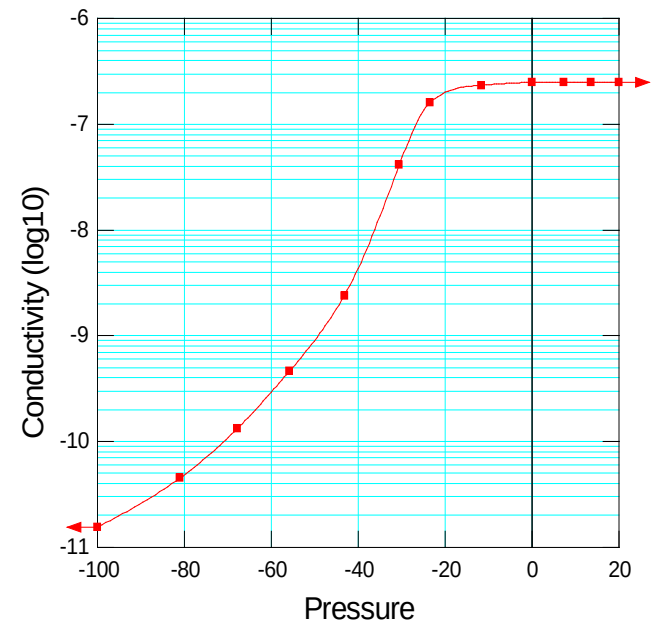
**Μη κορεσμένο
έδαφος.**

Νερό σε μηνίσκους μόνο.
Ακόμα μικρότερη
διαθέσιμη επιφάνεια.

Η ροή του υγρού των πόρων γίνεται διά μέσου της υγρής φάσης μόνο, και του αερίου διά μέσου της αέριας φάσης.



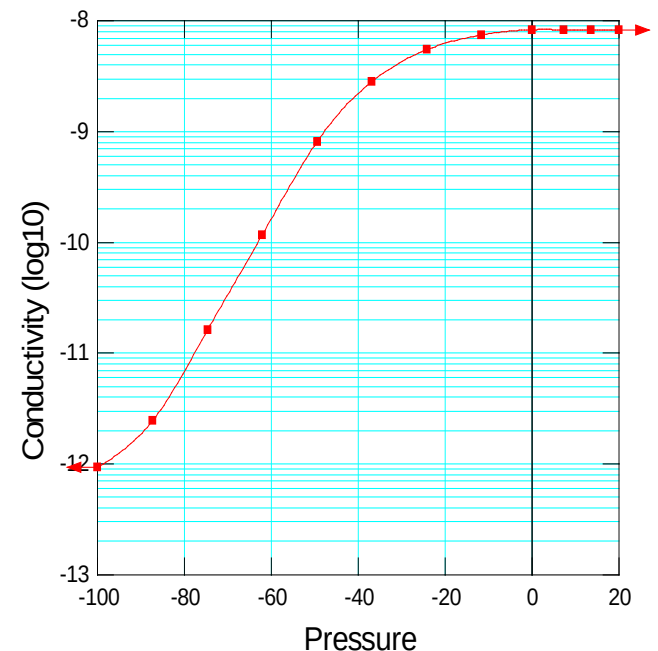
Ιλύς



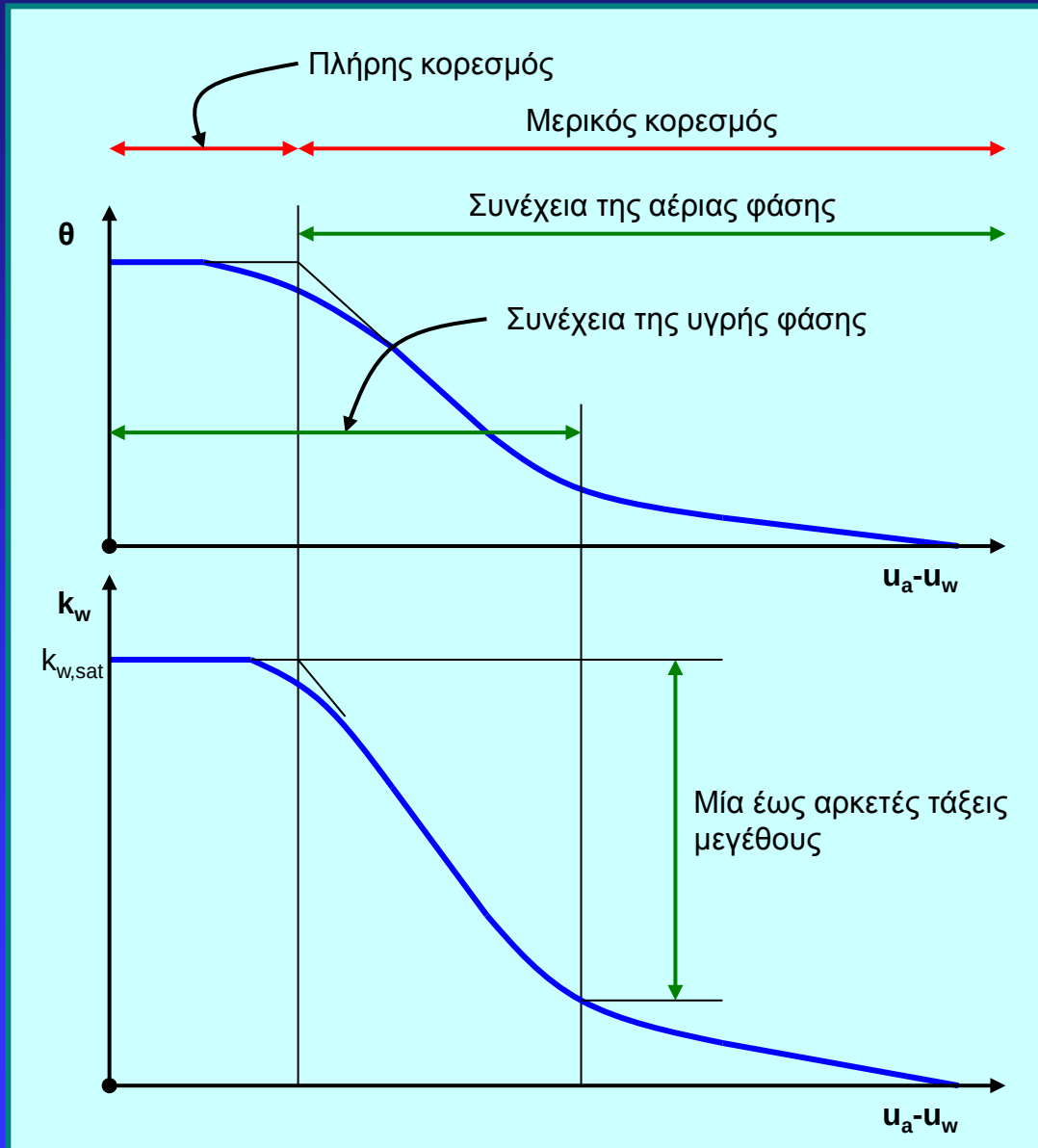
Άμμος

Άργιλος

Το μακροσκοπικό αποτέλεσμα της ύπαρξης της αέριας φάσης είναι ότι μειώνεται κατά αρκετές τάξεις μεγέθους ο συντελεστής διαπερατότητας του εδάφους ως προς το νερό.



Συσχέτιση της εξέλιξης του συντελεστή διαπερατότητας με την μύζηση με την χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού



Η εξίσωση Laplace για πλήρως κορεσμένα εδάφη

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h_w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h_w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h_w}{\partial z} \right) = 0$$

h_w το υδραυλικό δυναμικό

Όσο νερό εισέρχεται σε δεδομένο όγκο εδάφους, τόσο εξέρχεται (εκτός αν υπάρχουν μεταβολές του ολικού όγκου)

Η εξίσωση Laplace για μη κορεσμένα εδάφη

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h_w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h_w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h_w}{\partial z} \right) = \frac{\partial \theta}{\partial t}$$

h_w το υδραυλικό δυναμικό,

k_i , εξαρτάται από την μύζηση,

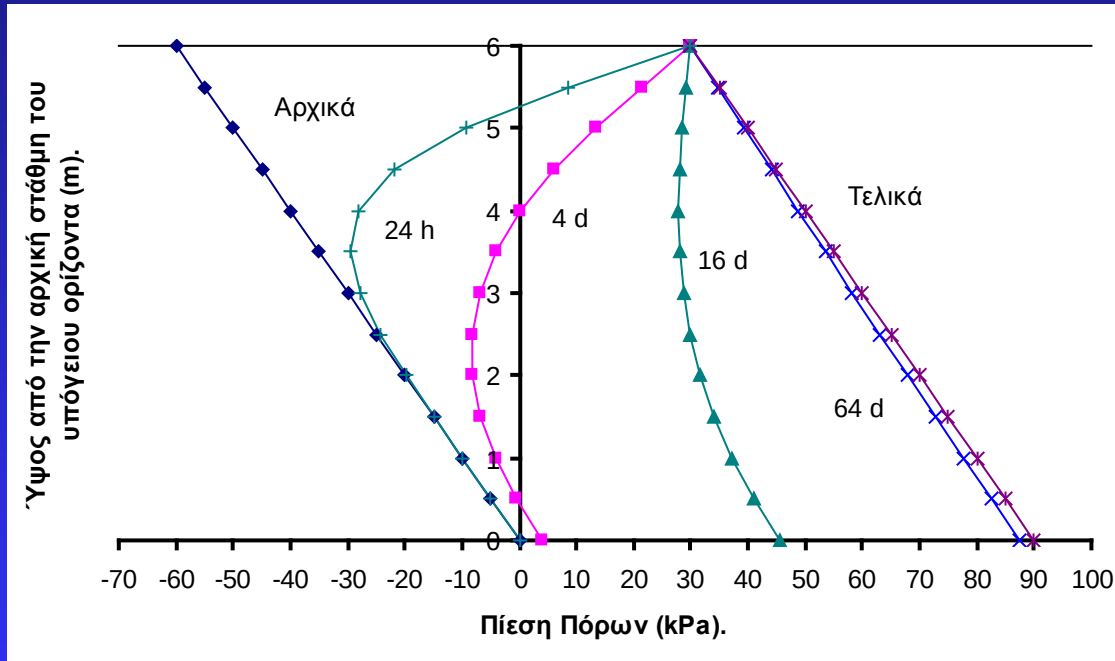
θ , το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας, $\theta = V_w/V_{ολ} = nS_r$



Η διαφορά του νερού που εισέρχεται από εκείνο που εξέρχεται σε δεδομένο όγκο εδάφους εκφράζεται από την μεταβολή του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας (ακόμα και αν δεν υπάρχουν μεταβολές του ολικού όγκου)

Για να επιλυθούν προβλήματα μη μόνιμης ροής απαιτούνται ως δεδομένα η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού σε όρους θ -μύζησης και η καμπύλη k -μύζησης

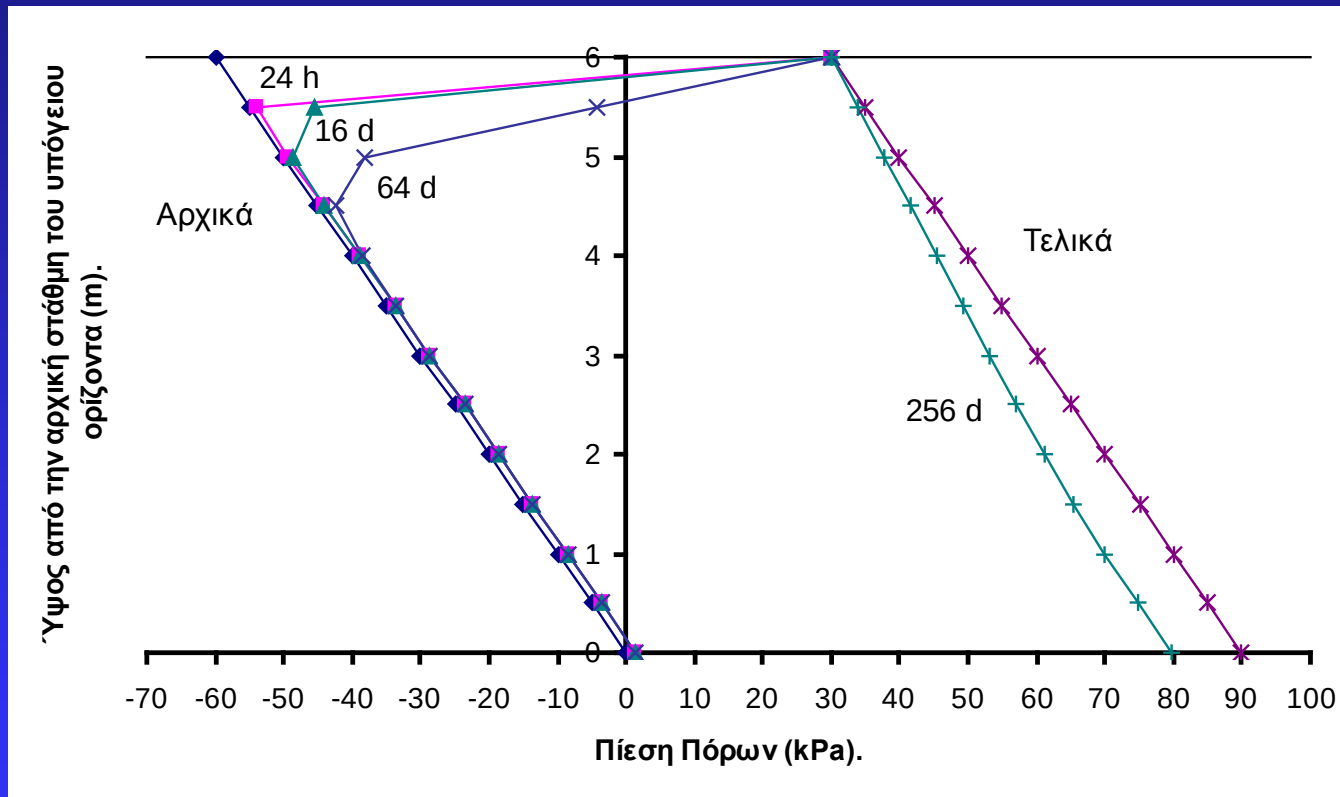
Μεταβολή της πίεσης πόρων μέσα στη μη κορεσμένη ζώνη του εδάφους.



Η Στάθμη Υπόγειου Ορίζοντα βρίσκεται αρχικά 6 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους και επιβάλλεται στην επιφάνεια πίεση 30 kPa.

Υποθέτουμε ότι ο συντελεστής διαπερατότητας παραμένει σταθερός, ίσος με αυτόν της αργίλου όταν είναι πλήρως κορεσμένη.

Μεταβολή της πίεσης πόρων μέσα στη μη κορεσμένη ζώνη του εδάφους.



Ο συντελεστής διαπερατότητας μεταβάλλεται με την αρνητική πίεση πόρων ή την μύζηση.

Συμπεράσματα

- Σήμερα πια υπάρχουν τα θεωρητικά προσομοιώματα και τα πειραματικά δεδομένα που έχουν επιτρέψει την κατανόηση της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών.
- Οι εργαστηριακές συσκευές μέτρησης και ελέγχου της μύζησης αυτόνομα ή σε συνδυασμό με άλλες συσκευές εκτέλεσης δοκιμών προσδιορισμού μηχανικών χαρακτηριστικών διαδίδονται ολοένα και περισσότερο και είναι πολύ πιο προσιτές σε σχέση με λίγα χρόνια πριν.
- Διεθνώς υπάρχουν πολύ μεγάλης σημασίας εφαρμογές που η ενσωμάτωση της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών έχει πολύ σημαντικό αν όχι τον κύριο ρόλο.
- Στην Ελλάδα τέτοιες εφαρμογές δεν έχουν υπάρξει μέχρι σήμερα. Η ανάγκη κατανόησης της μηχανικής συμπεριφοράς μη κορεσμένων εδαφών περιορίζεται στην ερμηνεία εργαστηριακών αποτελεσμάτων και προβλήματα μεταβολών όγκου λόγω υδρεμποτισμού.